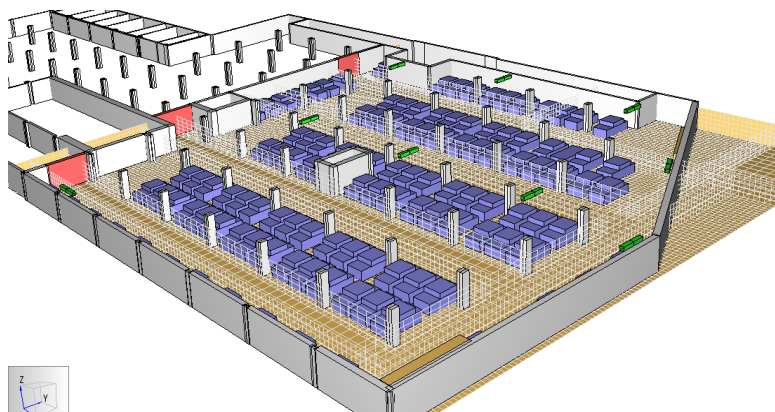




**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ISEL**



**Desenfumagem em Edifícios – Parque de estacionamento coberto (Retail -  
Oeiras Parque)**

**SÉRGIO PAULO INOCÊNCIO DE CARVALHO**

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre

em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Jorge Mendonça e Costa

Professor João Manuel Vinhas Frade

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais: Prof. Doutor Jorge Saraiva

Prof. Francisco Manuel Fernandes Severo

Prof. Doutor Jorge Mendonça e Costa

Prof. João Manuel Vinhas Frade

**Setembro de 2011**

# Agradecimentos

---

Ao professor Jorge Mendonça e Costa, sem o qual seria praticamente impossível a realização desta tese, pela sua orientação, apoio a todos os níveis e total disponibilidade no esclarecimento de dúvidas colocadas ao longo do trabalho.

Ao professor João Vinhas Frade pela disponibilidade verificada no apoio e no esclarecimento de dúvidas.

Aos representantes da empresa *ENERONE*, nomeadamente ao Eng. Carlos Soares pela colaboração neste trabalho ao nível da partilha de dados sobre o parque em estudo.

Ao Eng. Jorge Saraiva por ter disponibilizado a informação na fase inicial do trabalho e à minha família, amigos e colegas, pela ajuda e incentivo depositados ao longo do trabalho.

# Resumo

---

Os parques de estacionamento surgiram da necessidade de disponibilização de espaço de estacionamento de veículos que fazem parte do quotidiano do Homem, no entanto devido ao facto de poderem ser confinados ou subterrâneos requerem a instalação de ventilação forçada (ventiladores axiais e ventiladores de impulso).

Este trabalho tem como objectivo a análise, utilizando métodos de simulação numérica da ventilação forçada criada pelos ventiladores de impulso e pelos ventiladores axiais instalados num parque de estacionamento subterrâneo. Vão ser comparadas várias simulações com situações diferentes em termos de condições de fronteira, obstruções ao escoamento, etc., por forma a tirar conclusões sobre o comportamento do parque numa situação de emergência, ou seja, num incêndio. Este comportamento vai ter em conta a eficiência de evacuação dos gases libertados, as temperaturas no parque que permitem verificar onde estão localizados os gases mais quentes e os campos de velocidade do ar que permitem uma visualização do escoamento e até certo ponto a turbulência do mesmo.

No final pretende-se concluir por meio de comparação com outros documentos consultados, a “confiabilidade” do software usado (*FDS-Fire Dynamics Simulator*) e adicionalmente tirar conclusões sobre o projecto do parque, nomeadamente sobre a necessidade de introdução de alterações.

## **Palavras-chave:**

Parque de estacionamento subterrâneo; ventilador axial; ventilador de impulso; FDS; incêndio.

# Abstract

---

Car parks result from the need of space availability for vehicles so widely used by Mankind, however due to space constraints car parks have to be confined or built underground, requiring the installation of ventilation (axial fans and jet fans).

This work aims at the analysis, using numerical methods, of the forced ventilation created by jet fans and by axial fans installed in an underground car park. Several simulations will be compared based on different initial parameters, such as boundary conditions, obstructions to the flow, etc., in order to draw conclusions concerning the behavior of the park in an emergency situation, i.e. in a fire. This behavior will take into account the efficiency of the gases extraction, the temperature profiles in the park that allow identifying where the hottest gases are located, as well as air velocity profiles detailing the flow characteristics (e.g. stagnation regions, turbulence, etc.).

Finally this work aims at drawing conclusions concerning the trustworthiness of the software used (FDS-Fire Dynamics Simulator) by comparing with other consulted references, and also to draw conclusions on the Park design and the possible need to introduce changes.

## **Keywords:**

Car park; axial fan; jet fan; FDS; fire.

## Índice

1.	Lista de Imagens .....	7
2.	Lista de Tabelas .....	9
3.	Legislação .....	10
3.1.	Em Portugal .....	10
3.2.	Norma Inglesa (BS 7346-7) .....	12
3.3.	Cálculo dos caudais associados a cada norma .....	13
4.	Ventiladores de Impulso .....	14
4.1.	Princípio de funcionamento .....	15
5.	Método de Cálculo .....	16
5.1.	Equações Fundamentais Aplicadas .....	17
5.1.1.	Conservação de Massa .....	17
5.1.2.	Conservação de Quantidade de Movimento (Momento) .....	18
5.1.3.	Conservação de Energia .....	19
5.2.	Algoritmo de cálculo .....	20
6.	Modelo de turbulência .....	22
6.1.	Large Eddy Simulation (LES) .....	22
7.	Difusão numérica .....	24
8.	Correcção de Fluxo .....	25
9.	Validação do Software “ <i>Fire Dynamics Simulator</i> ” usado para o Estudo do Parque .....	26
9.1.	Introdução .....	26
9.2.	Conceitos aplicados no documento usado para comparação .....	27
9.3.	Modelação .....	28
9.3.1.	Modelação do ventilador de impulso .....	28
9.3.2.	Malha .....	30
9.4.	Resultados .....	32
9.4.1.	Ventilador simulado no <i>FDS</i> .....	32

9.4.2. Comparação das velocidades .....	34
9.4.3. Sumário Final.....	37
10. Retail Parque Oeiras .....	38
10.1. Introdução.....	38
10.1.1. Edifício Principal .....	39
10.1.2. Edifício em Construção .....	40
10.1.3. Ventilador de Impulso possivelmente adoptado no Parque.....	41
10.2. Modelação do Parque em 3D .....	44
10.2.1. Parâmetros de simulação inseridos .....	46
10.3. Análise de Escoamentos.....	49
10.3.1. Ventilação de impulso desligada (Com/sem veículos) .....	50
10.3.2. Ventilação de impulso ligada.....	53
10.3.3. Simulação Final (inclui fonte de calor) .....	56
10.3. Sumário Final .....	62
11. Conclusão .....	64
12. Bibliografia.....	65

## 1. Lista de Imagens

Figura 1- Exemplos de ventiladores de impulso .....	14
Figura 2 - Volume de controlo para um ventilador de impulso .....	15
Figura 3 - Geometria do ventilador de impulso .....	28
Figura 4 - Pormenor da malha na zona do ventilador .....	30
Figura 5 – Vista superior da malha .....	30
Figura 6 – Vista de frente da malha.....	31
Figura 7 – Vista de lado da malha.....	31
Figura 8 – Campo de velocidades segundo o plano x-z .....	32
Figura 9 – Gráfico de velocidades ao longo do tempo para as várias medições.....	33
Figura 10 - Velocidades médias ao longo do eixo do jacto do ventilador de impulso .....	35
Figura 11 -Evoluições da velocidade nas diferentes simulações .....	36
Figura 12 - Comparação das velocidades do ventilador de impulso real e da simulação .....	37
Figura 14 - Vista de satélite da localização do Parque Oeiras .....	38
Figura 13 – Entrada do Parque Oeiras.....	38
Figura 15 – Interior restauração .....	39
Figura 16 – Aspecto exterior.....	39
Figura 17 – Pormenor exterior .....	39
Figura 19 - Imagem Robot do novo Retail a ser construído .....	40
Figura 18 – Imagem robot exterior.....	40
Figura 21 - Dados técnicos do ventilador de impulso adoptado .....	41
Figura 22 - Geometria do ventilador de impulso adoptado .....	41
Figura 20 – Ventilador de impulso.....	41
Figura 23 - Geometria do ventilador de impulso no programa de simulação.....	42
Figura 24 - Condição de fronteira imposta no programa <i>FDS</i> .....	43
Figura 25 - Campo de velocidades do ventilador de impulso possivelmente adoptado no parque .....	43
Figura 26 - Geometria 3D do piso -3.....	44
Figura 27 - Imagem ilustrativa do parque com os veículos estacionados no seu interior .....	44
Figura 28 - Pormenor do parque ilustrando a geometria dos veículos .....	45
Figura 29 - Imagem ilustrativa das superfícies de admissão e extracção .....	45
Figura 30 - Malha usada na simulação .....	49

Figura 31 - Campo de velocidades no plano $z=1.5\text{m}$ sem veículos no interior do parque .....	50
Figura 32 - Campo de velocidades no plano $z=1.5\text{m}$ com veículos no interior do parque .....	50
Figura 33 - Campo vectorial de velocidades no plano $z=1.5\text{m}$ na zona de admissão .....	51
Figura 34 - Campo vectorial de velocidades no plano $z=1.5\text{m}$ na zona de extracção.....	51
Figura 35 - Posições dos ventiladores de impulso e pormenor de um dos equipamentos.....	53
Figura 36 - Campo de velocidades no plano $z=1.5\text{m}$ sem ventilação de impulso .....	54
Figura 37 - Campo de velocidades no plano $z=1.5\text{m}$ com ventilação de impulso .....	54
Figura 38 - Campo de velocidades no plano $z=3\text{m}$ com ventilação de impulso.....	55
Figura 39 - Diagrama de potência térmica da fonte de calor ao longo do tempo .....	56
Figura 40 - Posição da fonte de calor .....	56
Figura 41 - Campo de velocidades no instante $t=240\text{s}$ .....	57
Figura 42 - Campo de velocidades no instante $t=120\text{s}$ .....	57
Figura 43 - Campo de velocidades no instante $t=840\text{s}$ .....	57
Figura 44 - Campo de velocidades no instante $t=390\text{s}$ .....	57
Figura 45 - Campo de velocidades no instante $t=240\text{s}$ .....	58
Figura 46 - Campo de velocidades no instante $t=840\text{s}$ .....	58
Figura 47 - Campo de temperaturas no instante $t=240\text{s}$ .....	59
Figura 48 - Campo de temperaturas no instante $t=120\text{s}$ .....	59
Figura 49 - Campo de temperaturas no instante $t=840\text{s}$ .....	59
Figura 50 - Campo de temperaturas no instante $t=390\text{s}$ .....	59
Figura 51 - Campo de visibilidade no instante $t=240\text{s}$ .....	60
Figura 52 - Campo de visibilidade no instante $t=120\text{s}$ .....	60



## 2. Lista de Tabelas

Tabela 1- Dados do ventilador de impulso.....	25
Tabela 2 - Resultados e dados obtidos no documento consultado.....	30

### 3. Legislação

#### 3.1. Em Portugal

Desde o projecto até à construção é necessário obedecer e respeitar várias regras e regulamentos para que os parques de estacionamento cobertos estejam de acordo com a legislação em vigor. Estas regras diferem de país para país mas assentam sempre em estudos publicados por equipas de engenheiros, incluindo organizações internacionais para normalização. No caso da qualidade do ar a organização mundial de saúde também publica algumas normas sobre o assunto.

Em Portugal existem documentos para o efeito, nomeadamente o regulamento geral de segurança em edifícios, aplicado especialmente para situações onde exista o risco de incêndios. A portaria nº 1532/2008, de 29 de Dezembro aborda o aspecto específico da Segurança contra Risco de Incêndio.

Neste documento pode-se encontrar indicadores úteis em função do tipo de construção, ocupação e área para definir quais os requisitos para equipamentos de ventilação, capacidade de ventilação, qualidade do ar, manutenção e até mesmo rotas de evacuação. Todos estes requisitos têm a sua publicação no decreto de lei nº220/2008 de 12 de Novembro e na portaria nº1532/2008 de 29 de Dezembro.

Esta portaria tem como aspectos relevantes a especificação dos sistemas activos para controlo de poluição que devem garantir caudais de extracção de  $300\text{m}^3/\text{h}$  por veículo ou  $600\text{m}^3/\text{h}$  por veículo tendo em conta, respectivamente, as concentrações de monóxido de carbono de 50 ppm e 100 ppm. Estes valores encontram-se presentes no capítulo VIII – Controlo de poluição do ar e capítulo VI – Condições gerais dos equipamentos e sistemas de segurança da Portaria referida acima. Neste capítulo é também referido que os níveis de CO não podem ser superiores a 50 ppm em valores médios durante 8 horas e 200 ppm como valor instantâneo. Nestes espaços se os níveis instantâneos excederem os 200 ppm as pessoas devem ser avisadas por um alarme óptico junto aos acessos do espaço. Os detectores para a concentração de monóxido de carbono devem estar colocados a 1,5m de altura do pavimento e distribuídos correctamente com o objectivo de cada um cobrir uma área de  $400\text{ m}^2$ . As câmaras corta-fogo para o controlo da poluição podem ser garantidas com 5 renovações/h. Para o controlo de fumo nos pisos está definido que os ventiladores têm de assegurar  $600\text{ m}^3/\text{h}$  por veículo durante um período mínimo de 60 minutos. Nas escadas tem de ser assegurada uma

sobrepressão de 20 a 80 Pa com as portas encerradas e o escoamento com velocidade não inferior a 0,5 m/s.

Existem outros parâmetros que devem ser seguidos na portaria como, por exemplo, evitar pressões positivas geradas pelos ventiladores de impulso, porque podem sobrepor-se às depressões geradas pelos ventiladores de extracção e reduzir a eficácia de extracção entre outros parâmetros que contribuem para a eficácia do projecto deste tipo de edifícios. Na ligação entre pisos deve-se assegurar um escoamento descendente nas rampas (insuflação de elevadas quantidades de ar novo no piso acima ou colocação de ventiladores de impulso) e deve-se reduzir a admissão de ar novo proveniente de outros pisos através de rampas de acesso (fechar totalmente ou parcialmente as rampas com portões corta-fogo ou cortinas resistentes ao fumo).

### 3.2. Norma Inglesa (BS 7346-7)

Esta norma Inglesa contém também recomendações para o cálculo e construção dos parques de estacionamento cobertos, apresentando-se uma pequena comparação dos valores mais básicos em relação à legislação Portuguesa.

Em termos do controlo de poluição, considerando que este é realizado mecanicamente, a norma apresenta como referência 6 renovações/h e, em locais de maior tráfego, 10 renovações/h. Ou então caudais que garantam concentrações médias de CO inferiores a 30 ppm durante 8 horas e menos de 90 ppm durante um período máximo de 15 minutos.

Quanto ao controlo de fumo também são apresentados valores típicos para cálculo e para projecto quer seja de caudais quer seja de velocidades. Em termos de extracção é indicado na norma que esta deve ser feita com recurso a focos de extracção num nível superior e inferior (50% cada). A velocidade de admissão de ar não deve ser superior a 2 m/s e deve assegurar um caudal de ventilação de 10 renovações/h.

É indicado também que o parque deve ser dividido em zonas de detecção e controlo de fumo com área não superior a 2000 m<sup>2</sup>, onde exista 2 ventiladores de extracção para cada zona (em caso de falhas apenas um deles deve assegurar a capacidade de exaustão). Nas zonas de evacuação a velocidade do escoamento não deve exceder os 5m/s e o caudal de exaustão deve ser calculado de forma a que a pressão nas aberturas de exaustão seja igual à pressão atmosférica exterior.

### 3.3. Cálculo dos caudais associados a cada norma

Sendo assim e para poder ter uma noção prática da diferença de valores de caudais exigidos em cada norma, foram realizados os seguintes cálculos:

Pela legislação portuguesa:

$$600 \text{ m}^3/\text{veículo} \quad 120 \text{ veículos} = 120 \times 600 = \mathbf{72000 \text{ m}^3/h}$$

Pela norma inglesa:

*Cálculo do volume do parque:*

$$\text{Área do parque} = 3336 \text{ m}^2$$

$$\text{Pé direito} = 3,25 \text{ m}$$

$$\text{Volume do parque} = 3336 \times 3,25 = 10842 \text{ m}^3$$

De acordo com a norma em caso de incêndio a ventilação tem de assegurar 10 renovações por hora:

$$V_{\text{ADMISSÃO/EXTRACÇÃO}} = 10842 \times 10 = \mathbf{108420 \text{ m}^3/h}$$

Olhando para os dois valores de caudal necessário pode-se verificar que a norma inglesa exige mais caudal que a legislação portuguesa o que pode indicar que a forma como se trabalha em Portugal pode não ser a correcta para uma situação de incêndio. A norma inglesa exige aproximadamente mais 33% de caudal que a legislação portuguesa, no entanto para este trabalho e como o edifício está a ser construído em Portugal o caudal considerado mais à frente para as simulações foi de **72000 m<sup>3</sup>/h**.

## 4. Ventiladores de Impulso

Os ventiladores de impulso são utilizados para a ventilação de parques de estacionamento e de espaços com grandes dimensões onde a poluição deve ser removida eficazmente. Sendo assim os ventiladores de impulso englobam parte do conceito de controlo de fumo e desenfumagem em caso de situação de emergência, ou seja, um incêndio.

Os ventiladores de impulso são compostos por uma estrutura tubular longa em que alguns apresentam nas suas extremidades cones com atenuadores de som. No interior desta estrutura tubular encontra-se um ventilador accionado por um motor eléctrico que vai induzir o escoamento do ar e dos gases tóxicos numa determinada direcção conforme a orientação da estrutura.

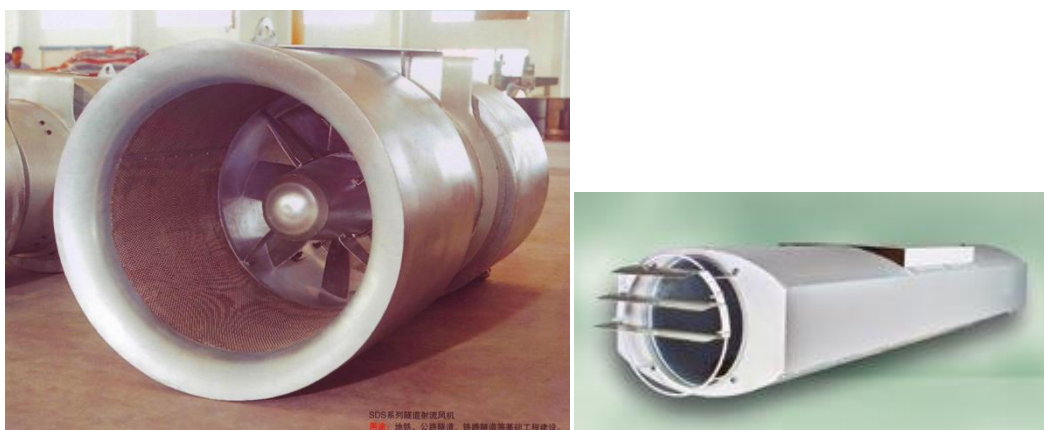


Figura 1- Exemplos de ventiladores de impulso

Estes ventiladores são dispostos no parque de estacionamento para que a circulação dos fumos seja o mais eficaz possível e direccionada para os pontos de extracção onde existem ventiladores axiais para retirar os fumos, de forma a criar uma atmosfera, dentro do parque, respirável e menos perigosa. Mostra-se, mais adiante no documento, como a disposição no caso em estudo está organizada e quais os ventiladores possivelmente adoptados no parque.

#### 4.1. Princípio de funcionamento

Tal como acontece com a ventilação em túneis, os ventiladores de impulso são montados no tecto e obtêm o seu efeito através do impulso de um caudal de ar. A alta indução de ar em seu redor forma-se no ventilador, e num curto intervalo de tempo o volume de ar em todo o parque começa a circular.

Se se considerar um volume de controlo idêntico a um túnel tal como na figura 2 com uma área de entrada  $S$ , uma pressão  $P_0$ , uma velocidade de entrada  $V_0$ , uma secção  $S_V$  para o ventilador e se considerarmos os mesmos parâmetros para a saída, pode-se escrever para o impulso o seguinte:

$$Impulso = \rho \times V_S \times S_V \times (V_S - V_0)$$

A expressão representa o impulso do ventilador quando colocado num campo de velocidades  $V_0$ .

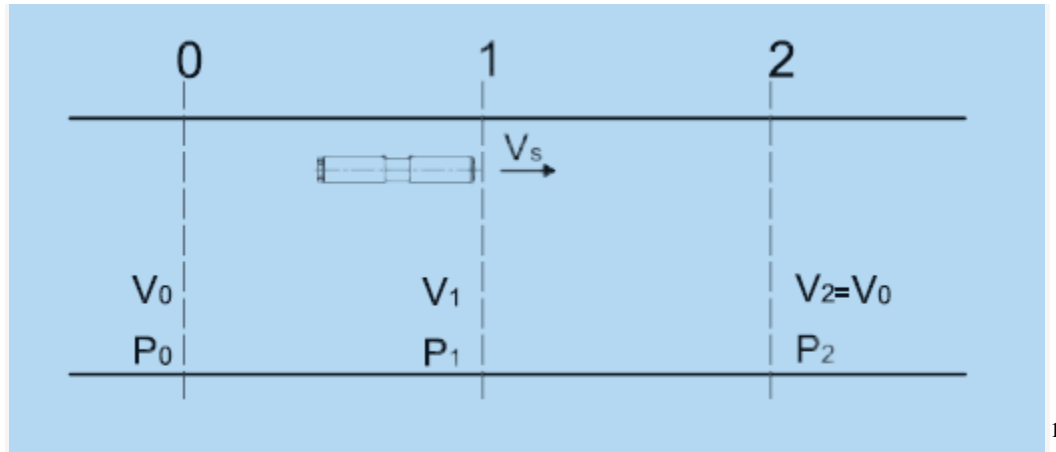


Figura 2 - Volume de controlo para um ventilador de impulso

<sup>1</sup> Imagem retirada de um documento de consulta presente na Bibliografia

## 5. Método de Cálculo

Neste capítulo vai ser demonstrado o método de cálculo usado para a análise do escoamento de ar no interior do parque de estacionamento. Vão ser apresentadas as equações fundamentais (escoamento) e a sua relação com o software utilizado (FDS – *Fire Dynamics Simulator*).

O modelo hidrodinâmico que o FDS utiliza resolve as equações de Navier-Stokes adequadas para escoamentos de baixa velocidade e escoamentos onde exista transferência de calor entre os fluidos em circulação (relevante em caso de incêndio). O modelo de turbulência assenta na teoria de Smagorinsky do método LES (*Large Eddy Simulation*).



## 5.1. Equações Fundamentais Aplicadas

Neste capítulo vão ser apresentadas as equações de conservação de massa, momento e energia para um fluido newtoniano, que foram retiradas do manual do programa usado nas simulações (*FDS Technical Reference Guide*). Estas são as mesmas equações que podem ser encontrados basicamente em qualquer livro sobre dinâmica de fluidos ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Este é um conjunto de equações diferenciais às derivadas parciais, composto por seis equações para seis incógnitas, que são função das três dimensões espaciais e do tempo: a massa volúmica  $\rho$ , as três componentes da velocidade  $\mathbf{u} = [u, v, w]^T$ ,  $T$  a temperatura, e a pressão  $p$ .

### 5.1.1. Conservação de Massa

Expressa em função da densidade  $\rho$ , das três componentes da velocidade  $\mathbf{u} = [u, v, w]^T$ , da temperatura  $T$  e da pressão  $p$ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b'''$$

Ou em função de cada tipo de gás:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot \rho Y_\alpha \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}'''$$

Na equação  $\dot{m}_b''' = \sum_\alpha \dot{m}_{b,\alpha}'''$  representa a produção de substâncias pela evaporação de partículas.

### 5.1.2. Conservação de Quantidade de Movimento (Momento)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}$$

O termo  $\mathbf{u} \mathbf{u}$  é um tensor. Em termos matriciais com  $\mathbf{u} = [u, v, w]^T$  o tensor é o resultado do produto de  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{u}^T$ . O termo da equação  $\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u}$  é um vector formado, aplicando o operador nabla  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$  ao tensor. O termo  $\mathbf{f}_b$  representa forças externas aplicadas, tais como, o arrastamento exercido por gotículas de líquido. O tensor de tensões  $\tau_{ij}$  é definido por:

$$\tau_{ij} = \mu \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) ; \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} ; S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$i, j = 1, 2, 3$$

O termo  $S_{ij}$  é o simétrico da taxa de deformação do tensor, usando notação convencional, onde o símbolo  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

Em geral a computação pode ser considerada como DNS (*Direct Numerical Simulation*) em que os termos dissipativos são calculados directamente, ou como uma simulação com grandes vórtices (LES), em que estes vórtices de grande escala são calculados directamente e, numa escala inferior, os processos dissipativos são modelados. A maior parte das aplicações do FDS são LES já que para salas de grande dimensão torna-se impossível resolver as equações de forma directa, porque a malha não pode ser muito refinada para o cálculo não ocupar muita memória nem demorar muito tempo, ou seja, só se aplica DNS quando as simulações são de pequena escala. A equação de conservação de quantidade de movimento (momento) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{F} + \nabla H = 0$$

E a equação de pressão:

$$\nabla^2 H = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{F}$$

$$\text{Com } H = \frac{|\mathbf{u}|^2}{2} + \frac{p}{\rho}$$

### 5.1.3. Conservação de Energia

Em função da entalpia ( $h_s$ ) a equação de conservação de energia pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon$$

A entalpia é função da temperatura:

$$h_s = \sum_{\alpha} Y_{\alpha} h_{s,\alpha} \quad ; \quad h_{s,\alpha}(T) = \int_{T_0}^T C_{p,\alpha}(T') dT'$$

O termo  $\dot{q}'''$  da equação anterior corresponde ao calor libertado por unidade de volume da reacção química e o termo  $\dot{q}_b'''$  será a energia transferida para a evaporação das gotículas.

## 5.2. Algoritmo de cálculo

O FDS usa uma aproximação de segunda ordem das diferenças finitas nas equações que resolvem a malha cúbica, onde as variáveis são actualizadas através de um esquema de segunda ordem do tipo Runge-Kutta. O algoritmo é o seguinte:

1. Cálculo do campo de velocidades  $\vec{u}^n$ .
2. Estimativa de  $\rho, Y_\alpha, \bar{p}_m$  no intervalo de tempo seguinte. Por exemplo o cálculo da massa volúmica é realizado através da seguinte fórmula:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n \vec{u}^n = 0$$

3. Aplicar mudanças de valores entre  $\rho^*$  e  $Y_\alpha$  nos limites dos elementos de malha, sendo que esta passagem de informação é feita por via MPI (*Message Passing Interface*)<sup>2</sup>
4. Aplicar as condições de fronteira para  $\rho^*$  e  $Y_\alpha$
5. Cálculo da divergência,  $\nabla \cdot \vec{u}^*$ , usando os valores termodinâmicos estimados. De notar, que nesta fase o campo de velocidade no intervalo de tempo seguinte não foi estimado, tendo sido apenas a sua divergência.
6. Resolução da equação de Poisson para a flutuação de pressão em cada elemento de malha, através da seguinte equação

$$\nabla^2 H^n = - \left[ \frac{\nabla \cdot \vec{u}^* - \nabla \cdot \vec{u}^n}{\delta t} \right] - \nabla \cdot \vec{F}^n$$

7. Estimar a velocidade no intervalo de tempo seguinte.

$$\frac{u^* - u^n}{\delta t} + \vec{F}^n + \nabla \cdot H^n = 0$$

8. Verificação do intervalo de tempo seguinte de modo a que:

$$\delta t \max \left( \frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) < 1 \quad ; \quad 2\delta t v \left( \frac{1}{\delta x^2}, \frac{1}{\delta y^2}, \frac{1}{\delta z^2} \right) < 1$$

---

<sup>2</sup> *Message Passing Interface (MPI)* é como que uma linguagem para comunicação de dados em computação paralela. Ou seja permite a troca de informação entre processos diferentes.

Se o intervalo de tempo for muito elevado, este é reduzido de forma a cumprir ambas as condições e o processo volta ao início do intervalo de tempo anterior.

Nesta altura está concluída a fase de predição dos intervalos de tempo, onde os valores de  $H^n$  e as componentes de  $u^*$  são transferidas entre diferentes elementos de malha por via MPI. Sendo assim o algoritmo de cálculo é corrido de novo mas agora são utilizadas novas equações para corrigir os valores das variáveis.

1. Cálculo do campo de velocidades  $\vec{u}^n$ .
2. Aplicação do esquema de Runge-Kutta de segunda ordem para actualizar as variáveis função da massa. A massa volúmica como exemplo será calculada da seguinte forma:

$$\frac{\rho^{n+1} - \frac{1}{2}(\rho^n + \rho^*)}{\frac{\delta t}{2}} + \nabla \cdot \rho^* \bar{u}^* = 0$$

3. Aplicar mudanças de valores entre  $\rho^*$  e  $Y_\alpha$  nos limites dos elementos de malha, sendo que esta passagem de informação é feita por via MPI (*Message Passing Interface*)
4. Aplicar as condições de fronteira para  $\rho^*$  e  $Y_\alpha$
5. Cálculo da divergência  $\nabla \cdot \bar{u}^{n+1}$  através dos valores termodinâmicos corrigidos. De notar que outra vez o campo de velocidades não foi corrigido.
6. Resolução da equação de Poisson para a flutuação de pressão em cada elemento de malha, através da seguinte equação

$$\nabla^2 H^* = - \left[ \frac{\nabla \cdot \bar{u}^{n+1} - \frac{1}{2}(\nabla \cdot \bar{u}^* + \nabla \cdot \bar{u}^n)}{\frac{\delta t}{2}} \right] - \nabla \cdot \bar{F}^*$$

7. Actualizar a velocidade através do esquema de Runge-Kutta de segunda ordem:

$$\frac{u^{n+1} - \frac{1}{2}(\bar{u}^* + \bar{u}^n)}{\frac{\delta t}{2}} + \bar{F}^* + \nabla \cdot H^* = 0$$

8. No final do intervalo de tempo os valores de  $H^*$  e as componentes  $u^{n+1}$  são transferidas entre elementos de malha por via MPI.

## 6. Modelo de turbulência

### 6.1. Large Eddy Simulation (LES)

No CFD é importante o tratamento da turbulência e o FDS utiliza apenas o modelo LES, não sendo possível o cálculo de RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*).

LES é uma técnica usada para modelar o processo de dissipação (viscosidade, condutividade térmica, difusividade do material) que ocorre a uma menor escala que a malha definida. Isto significa que os parâmetros  $\mu$ ,  $k$  e  $D$  nas equações não podem ser usados directamente na maioria das simulações e então têm de ser substituídos por expressões que “modelam” o seu impacto na forma aproximada das equações principais.

Existe um pequeno termo na equação de conservação de energia conhecido pela taxa de dissipação,  $\epsilon$ , que representa a fracção de energia cinética que é convertida para energia térmica através da viscosidade.

$$\begin{aligned}\epsilon &= \tau_{ij} \cdot \nabla u = \mu \left( 2S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right) = \\ &= \mu \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]\end{aligned}$$

Normalmente este termo é desprezado na equação de energia dado que é muito pequeno em relação ao calor libertado pelo fogo. Para perceber de onde aparece este termo escreve-se a equação para a energia cinética do fluido através do produto da equação de conservação de momento pelo vector velocidade:

$$\rho \frac{Du}{Dt} \cdot u = \rho \frac{D \left( \frac{|u|^2}{2} \right)}{Dt} = \rho f_B \cdot u - \nabla p \cdot u + \nabla \cdot (\tau_{ij} \cdot u) - \epsilon$$

Embora como já foi dito este termo pode ser desprezado, a sua forma funcional tem utilidade para a representação da dissipação de energia cinética no campo de velocidades resolvido. Segundo Smagorinsky, a viscosidade  $\mu$  é modelada da seguinte forma:

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left( 2\overline{S_{ij}} : 2\overline{S_{ij}} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Nesta equação  $C_s$  representa uma constante empírica e  $\Delta$  é o comprimento do lado da malha. Os outros parâmetros de difusividade, a condutividade térmica e a difusividade do material estão relacionadas com a viscosidade turbulenta para:

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Pr_t} \quad ; \quad (\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t}$$

O número de Prandtl turbulento ( $Pr_t$ ) e o número de Schmidt turbulento ( $Sc_t$ ) são assumidos como constantes para cada cenário.

O Modelo para a viscosidade ( $\mu_{LES}$ ) tem dois papéis: o primeiro é o efeito de estabilizar o algoritmo numérico, excluindo as instabilidades numéricas à medida que vão aparecendo no escoamento, especialmente onde existe vórtices; o segundo papel é o facto de conter a forma apropriada para descrever a dissipação de energia cinética do escoamento.

Houve já numerosas evoluções no modelo de Smagorinsky, mas é difícil de chegar a estes melhoramentos para modelos que incluam a simulação de incêndios.

## 7. Difusão numérica

Difusão numérica é um problema com simulações de CFD realizadas em computador em que a média simulada apresenta um maior valor de difusividade do que a média verdadeira. Este fenómeno pode ser particularmente notório num sistema não difusivo, ou seja, um fluido ideal adquirir alguns valores falsos de viscosidade num modelo numérico.

Nas simulações de Euler, o tempo e o espaço são divididos em malhas e as equações diferenciais de quantidade de movimento são discretizadas em equações às diferenças finitas. As equações de diferenças finitas são em geral mais difusas do que as equações diferenciais originais, de modo que a simulação comporta-se de forma diferente do modelo físico. A quantidade e a importância desta diferença depende do sistema que está a ser simulado e do tipo de modelo usado. A maioria das simulações procuram reduzir a difusão numérica ao mínimo possível, para alcançar resultados com uma boa aproximação da realidade. Métodos numéricos de ordens superiores tendem a ter menos difusão numérica do que os métodos de ordem inferior.

Este fenómeno pode estar associado às diferenças mais à frente encontradas nas simulações efectuadas em FDS quando comparadas com outros softwares.



## 8. Correção de Fluxo

O modelo de segunda ordem de diferenciação finita utilizado no FDS não pode resolver totalmente gradientes de forma muito precisa em uma malha relativamente grosseira. Para o caso da fracção de massa em particular, pode-se dar o caso de uma solução onde a fracção de massa ultrapasse os limites admissíveis (ou seja, o método numérico transporta para dentro ou fora de uma célula da malha mais massa do que é fisicamente possível). O modelo numérico geral ainda é de conservação de massa, mas não físico em regiões de gradientes elevados e este problema pode ser reduzido, mas não eliminado, por meio de métodos numéricos de ordem superior. Outra solução é a realização de uma correção do fluxo de transporte, para isso é necessário examinar a solução final e encontrar regiões onde uma solução não-física existe e depois redistribuir a massa para corrigi-lo. Normalmente, isso resulta em um aumento da difusão numérica, no entanto, este é parcialmente atenuado dado que em qualquer iteração, a correção é aplicada a um pequeno número de células da malha.

O modelo de correção de fluxo é aplicado em ambas as fases (previsão e correção) depois de actualizar as fracções de massa para cada elemento do fluido. Para cada elemento do fluido, dois ciclos são realizados em cada malha computacional. O primeiro ciclo procura e corrige a falta de massa e o segundo corrige o excesso de massa. A falta de massa ocorre se a fracção de massa de um elemento é menor que o mínimo permitido, normalmente 0, ou se houve uma saída dessa espécie no intervalo de tempo anterior,  $\nabla \rho Y_{\alpha,ijk} < 0$ , e a fracção de massa de novas espécies é menor do que todas as suas células vizinhas. Um excesso de massa ocorre se a fracção de massa dos elementos é maior do que o máximo permitido, ou se houve uma entrada desses elementos no intervalo de tempo anterior,  $\nabla \rho Y_{\alpha,ijk} > 0$ , e se a fracção de massa dos novos elementos é maior do que todas as suas células vizinhas. Em cada ciclo uma matriz temporária é usada para armazenar os valores corrigidos, que são então aplicados globalmente no final de cada ciclo. Usando uma matriz temporária, em vez de uma correção imediata célula- célula, garante que as células que necessitam de correção não são anuladas devido à sequência de cálculo de cada ciclo. A falta de massa é corrigida primeiro porque num cálculo típico de elementos de mistura é mais provável ter uma falta de massa com um valor inferior ao mínimo absoluto para determinado elemento do que um excesso de massa exceder o máximo absoluto para cada elemento.

## 9. Validação do Software “*Fire Dynamics Simulator*” usado para o Estudo do Parque

### 9.1. Introdução

Este capítulo tem como objectivo validar o software usado na simulação final do parque de estacionamento e, para isso, vão ser realizadas várias simulações que serão posteriormente comparadas com outras obtidas por softwares de outras proveniências. Para garantir a comparabilidade dos resultados foram colocadas todas as restrições, condições de fronteira, volume da malha, etc., de forma equivalente às simulações já existentes num documento<sup>3</sup> pesquisado.

O computador onde foram realizadas as simulações tem como processador um Intel Core Centrino Duo T6400 com 4 GB de memória RAM e uma placa gráfica GeForce 9600M GT.

---

<sup>3</sup> Documento com o título de *Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures*

## 9.2. Conceitos aplicados no documento usado para comparação

Para realizar uma comparação tem que se reproduzir todas as condições necessárias para obter um resultado sobre o qual se possa retirar conclusões satisfatórias. No documento pesquisado e consultado para esta comparação são explicadas todas as condições da simulação real efectuada e das simulações em CFD, o que neste caso vai ter de coincidir para que os resultados possam ser comparados.

Sendo assim a sala onde o ventilador foi testado tinha 34m de comprimento por 32m de largura e um pé direito de 6.5m, mas na simulação final do ventilador o pé direito foi considerado de 3.6m dado que para as velocidades não tinha influência significativa e, com um volume de malha mais pequeno, o cálculo era mais rápido. O ventilador teria 2.6m de comprimento com 290mm de diâmetro e estaria colocado numa posição em que o seu centro estaria a 2.5m de altura. Na simulação realizada o diâmetro foi arredondado para 300mm para facilitar a sua modelação. As medições de velocidade foram realizadas às distâncias de 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 e 16m da superfície de saída do ventilador mas para comparação apenas existe dados no documento pesquisado para distâncias a partir dos 2m.<sup>4</sup> As medições foram realizadas em planos y-z, ou seja, paralelos à superfície de saída e à medida que se afastam dessa superfície maiores vão ficando os planos de medida (distância: 0.5m e 1m: área de medida 1.0m largura x 0.5m altura; distância: 2 e 4m: área de medida 2.0m largura x 1.0m altura; distância: 8, 12 e 16m: área de medida 4.0m largura x 2.0m altura).

---

<sup>4</sup> De notar que estas medições dizem respeito a distâncias medidas na situação real e que também foram adoptadas para as medições das simulações.

### 9.3. Modelação

#### 9.3.1. Modelação do ventilador de impulso

Para a modelação do ventilador de impulso teve de se ter em conta todas as restrições acima mencionadas com a diferença que neste software não é permitido o desenho de superfícies circulares nem cilíndricas, por isso, para melhor aproximação teve que se calcular o diâmetro hidráulico do ventilador de impulso e em seguida calcular uma secção quadrangular com diâmetro hidráulico equivalente. Apesar das simulações terem sido realizadas mantendo este critério, seria importante proceder a novas simulações em que as áreas das secções quadrangular e circular fossem as mesmas.

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad \text{Para um tubo circular: } D_H = \frac{4 \frac{\pi \times D^2}{4}}{\pi \times D} = D$$

$$\text{Para uma secção quadrangular: } D_H = \frac{4l \times l}{4l} = \frac{4l}{4} = l$$

Igualando:  $l = D \Rightarrow l = \text{diâmetro}$

Sendo assim o ventilador foi desenhado com uma secção quadrangular com 300mm (arredondado) de lado e com 2.6m de comprimento.

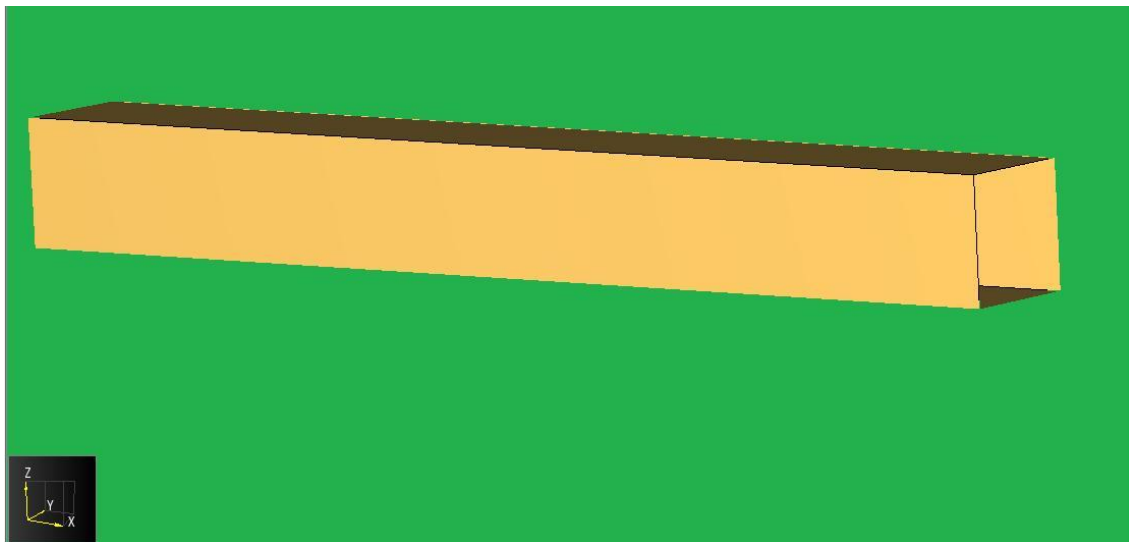


Figura 3 - Geometria do ventilador de impulso

No interior do ventilador foi criada uma superfície onde se inseriu a condição de fronteira de velocidade imposta no valor de 18 m/s, que corresponde ao valor das especificações do ventilador de impulso no documento consultado. O ventilador foi dimensionado com base nas seguintes especificações:

Impulso (N)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)	Secção (m)	Comprimento (m)
21	1	18	0.3	2.6

Tabela 1- Dados do ventilador de impulso

### 9.3.2. Malha

A dimensão da malha cúbica foi definida tendo em conta as condições fronteira, as dimensões do ventilador, etc. Daí a malha ser bastante refinada na zona do ventilador de impulso apresentando de lado 0.05m (5cm), embora a jusante a malha vá aumentando para 10cm de lado e 20cm de lado numa zona já distante de 8m da superfície de saída do ventilador.

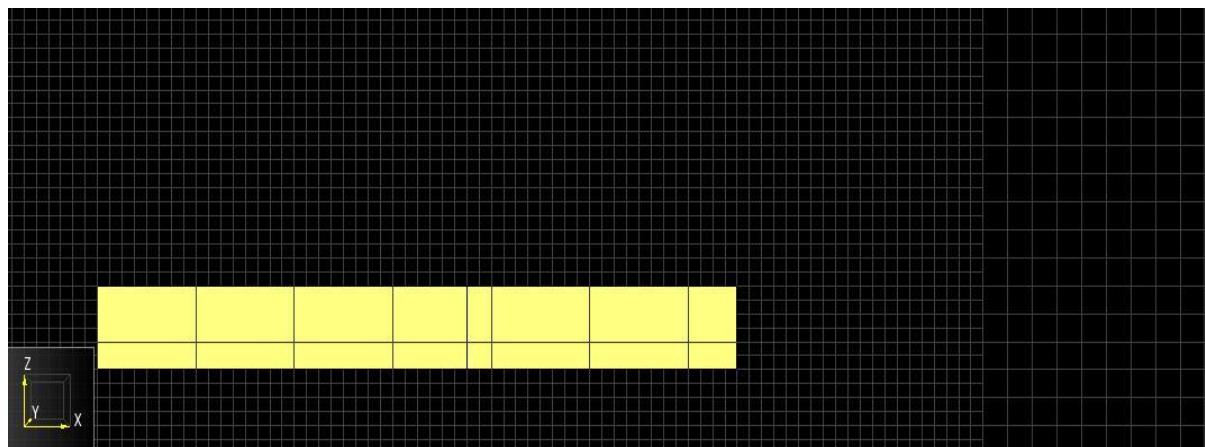


Figura 4 - Pormenor da malha na zona do ventilador

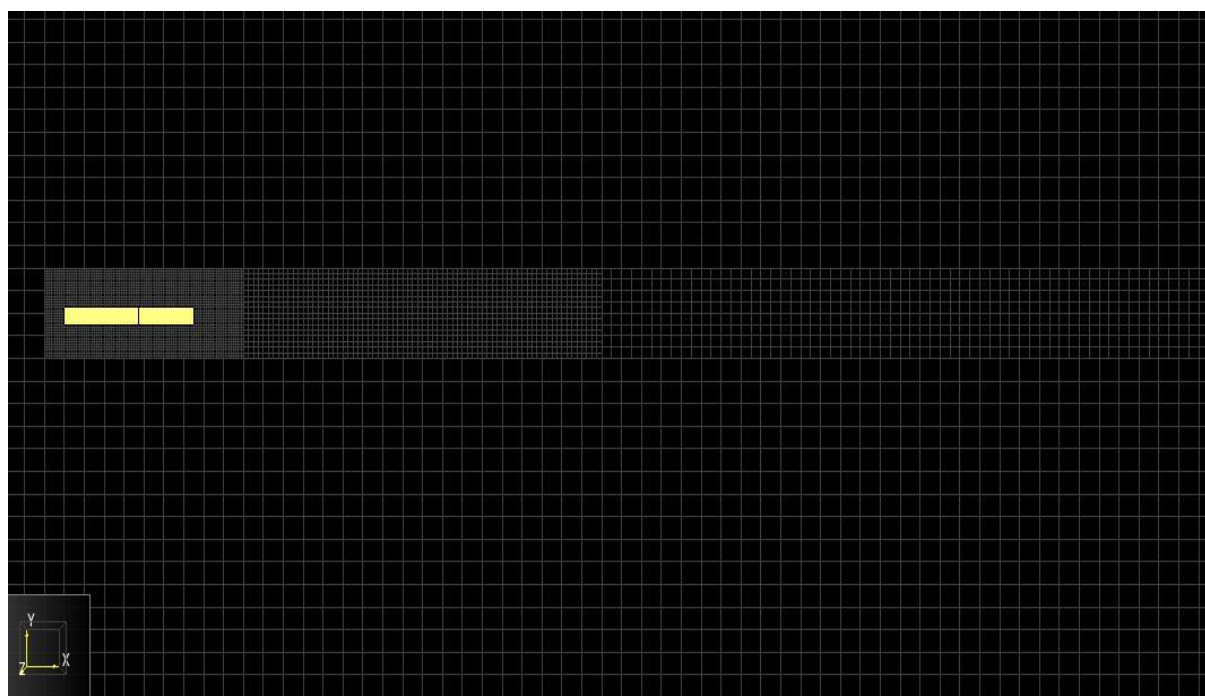


Figura 5 – Vista superior da malha

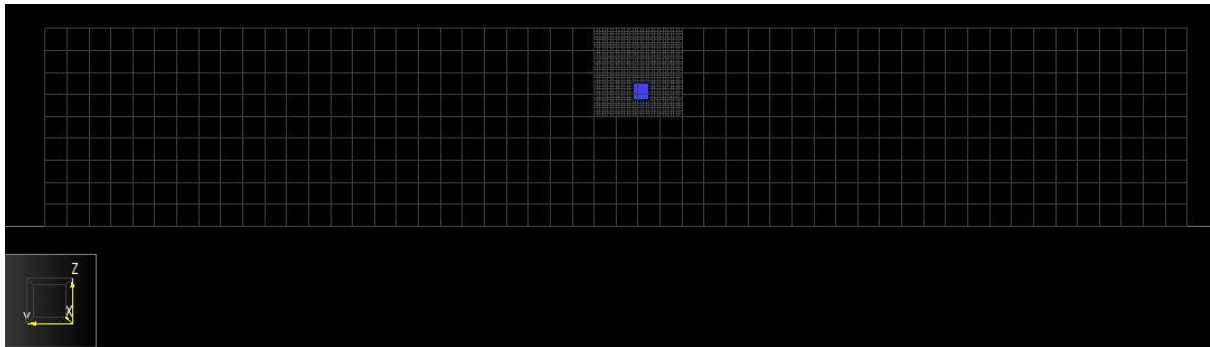


Figura 6 – Vista de frente da malha

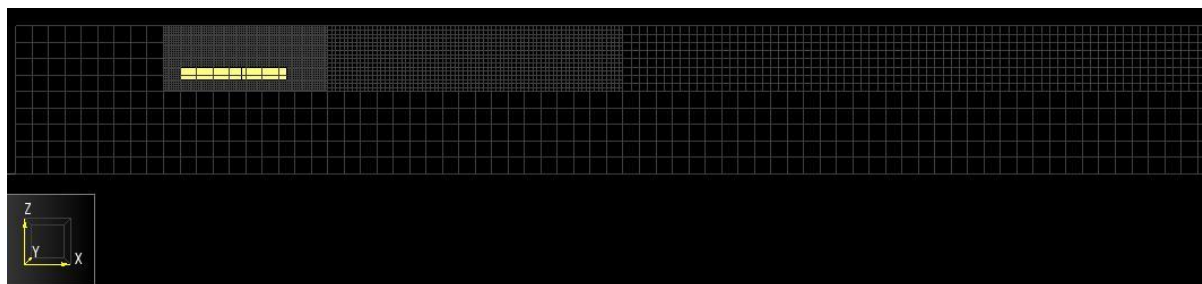


Figura 7 – Vista de lado da malha

## 9.4. Resultados

### 9.4.1. Ventilador simulado no *FDS*

O programa *FDS* gera uma série de resultados em tabelas e para uma melhor percepção existe um programa cujo nome é *Smoke View 5.6* que faz uma apresentação gráfica interessante.

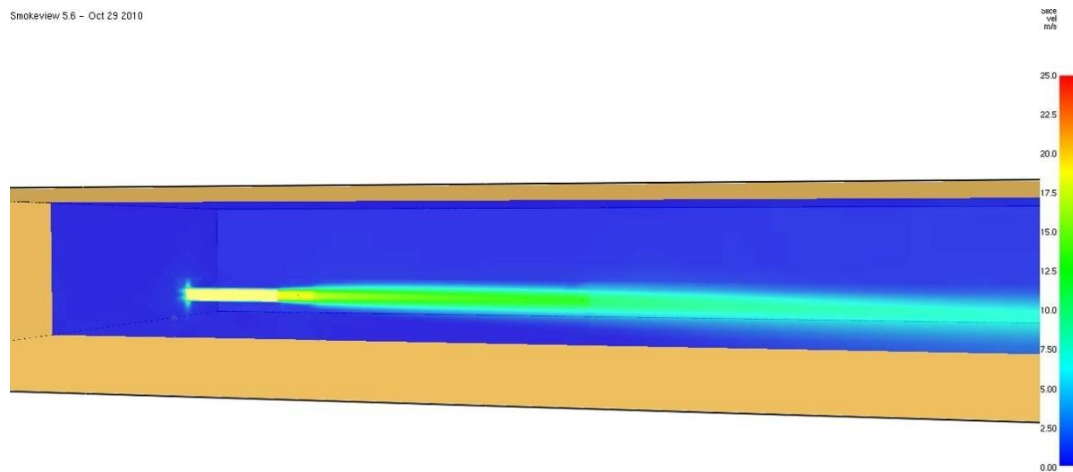


Figura 8 – Campo de velocidades segundo o plano x-z



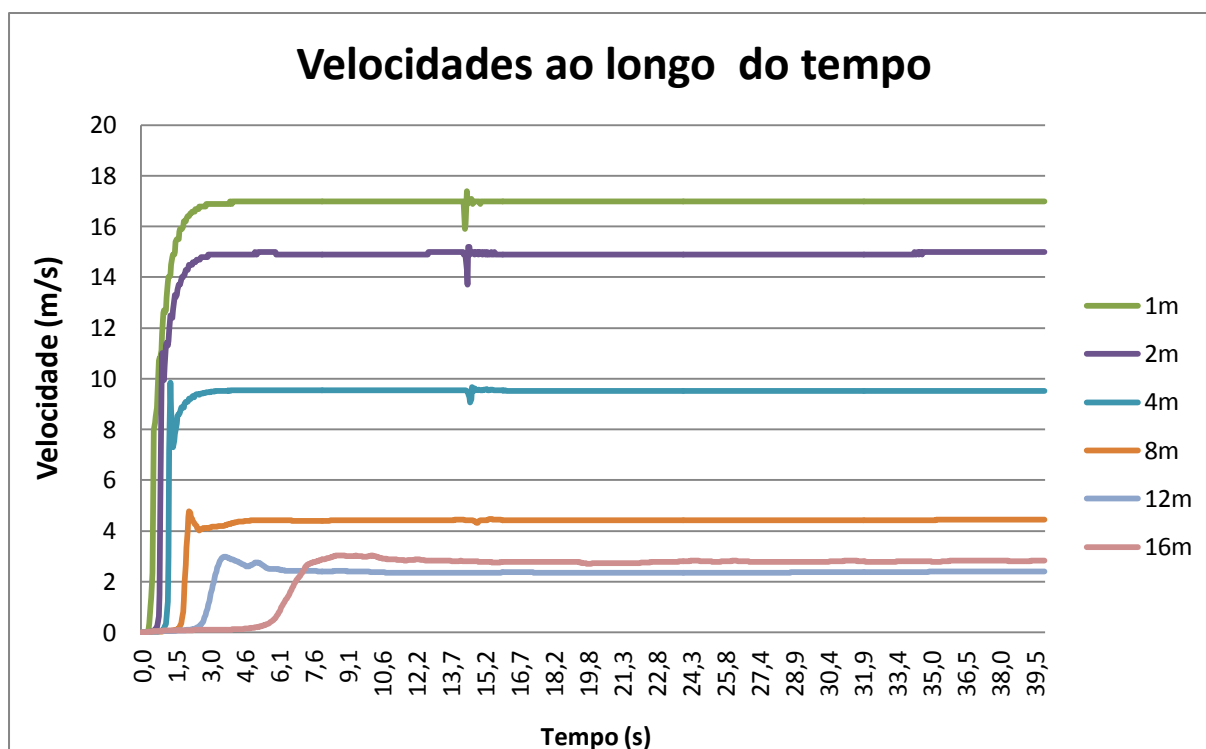


Figura 9 – Gráfico de velocidades ao longo do tempo para as várias medições

As simulações efectuadas são todas transientes, ou seja, dependem do tempo e o gráfico acima mostra exactamente a evolução da velocidade ao longo de 40s, que foi o tempo definido na simulação. Poderia ser mais tempo para verificar se iria existir alterações, e de facto foi feita uma simulação mais prolongada (600s) em que analisando os resultados dessa simulação a variação das velocidades nos diferentes planos iria ser muito pequena em relação aos valores obtidos no fim de 40s, logo decidiu-se utilizar 40s para diminuir o tempo de cálculo da simulação no computador.

#### 9.4.2. Comparação das velocidades

Neste ponto vão ser apresentados os resultados da simulação do ventilador de impulso e a comparação com os resultados obtidos no documento consultado para o efeito<sup>5</sup>. A tabela 2 indica os valores obtidos para as médias das velocidades nos vários planos de medição das várias simulações realizadas, quer neste trabalho, quer no documento consultado para comparação. Os valores calculados neste trabalho estão indicados com o nome "FDS", os restantes foram retirados do documento consultado e por fim os valores que apresentam a sigla (U/Umax) são valores adimensionais calculados fazendo a divisão da velocidade em cada plano pela velocidade máxima verificada no plano mais próximo do ventilador, para facilitar a análise da variação ao longo dos diversos planos, independentemente da velocidade inicial.

Distância (m)	2	4	8	12	16
<b>FDS</b>	14.95	9.53	4.44	2.40	2.83
<b>U/Umax (FDS)</b>	0.92	0.59	0.27	0.15	0.17
<b>k-ε standard</b>	16.40	9.40	4.70	3.40	2.50
<b>U/Umax (k-ε std)</b>	1.00	0.57	0.29	0.21	0.15
<b>k-ε RNG</b>	20.70	11.00	4.10	2.80	1.80
<b>U/Umax (k-ε RNG)</b>	1.00	0.53	0.20	0.14	0.09
<b>k-ε realizable</b>	20.10	10.80	4.70	3.30	2.50
<b>U/Umax (k-ε realiz)</b>	1.00	0.54	0.23	0.16	0.12
<b>k-ω standard</b>	9.10	6.10	2.70	0.60	0.40
<b>U/Umax (k-ω std)</b>	1.00	0.67	0.30	0.07	0.04
<b>Caso Real</b>	15.9	9.5	5.3	3.3	2.5
<b>U/Umax (Caso Real)</b>	1.00	0.60	0.33	0.21	0.16

Tabela 2 - Resultados e dados obtidos no documento consultado

Olhando para a tabela 2 e comparando os resultados pode-se verificar que em termos de velocidade na zona mais próxima da superfície de saída do ventilador de impulso o valor mais aproximado da simulação realizada no *FDS* seria a simulação real e em seguida a simulação realizada pelo método *k-ε standard*. Olhando para a evolução da simulação no programa *FDS* e comparando com a real verifica-se que os valores mais próximos da superfície de saída são bastante próximos e vão-se afastando à medida que a distância vai aumentando, sendo que a uma distância de 16m a variação é de 0.33 m/s, ou seja, corresponde a um valor percentual de 17.5%, e que ainda assim as simulações *k-ε RNG* e *k-ω Standard* apresentam maior erro .

<sup>5</sup> B.J.M. v.d.Giesen,., Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures

O gráfico seguinte representa a evolução das velocidades das várias simulações ao longo do eixo do ventilador de impulso. A evolução obtida neste trabalho está representada a azul claro e a linha apresenta uma espessura superior às restantes.

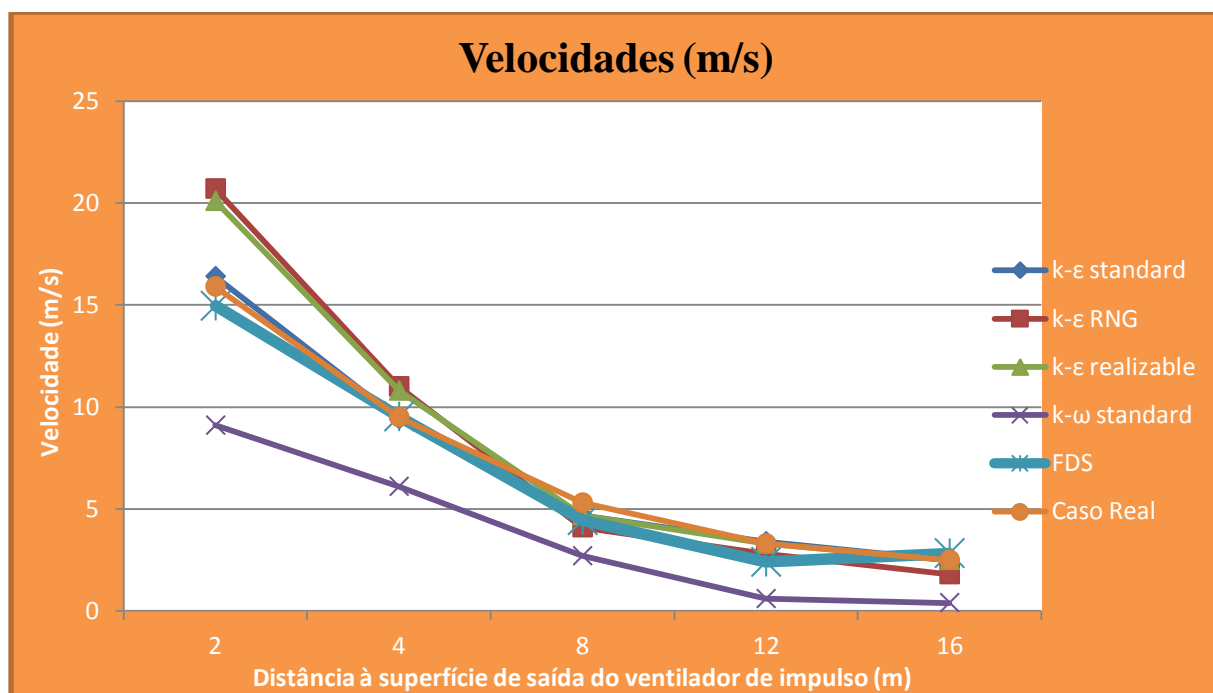


Figura 10 - Velocidades médias ao longo do eixo do jacto do ventilador de impulso

Comparando as várias simulações com a evolução real pode-se verificar que os métodos que se aproximam mais são o método *k-ε standard* e *FDS*; os métodos *k-ε RNG* e *k-ε realizable* fornecem uma boa aproximação mas só para uma distância a jusante, já que no início apresentam um desvio significativo.

O método que está mais afastado em todo o eixo do ventilador de impulso é o método *k-ω standard*, que para qualquer distância apresenta valores díspares quer do caso real, quer das outras simulações.

Os valores usados no gráfico seguinte são calculados como explicado anteriormente e têm como objectivo uma observação mais detalhada das curvas em termos de tendências e não para comparação dos valores absolutos.

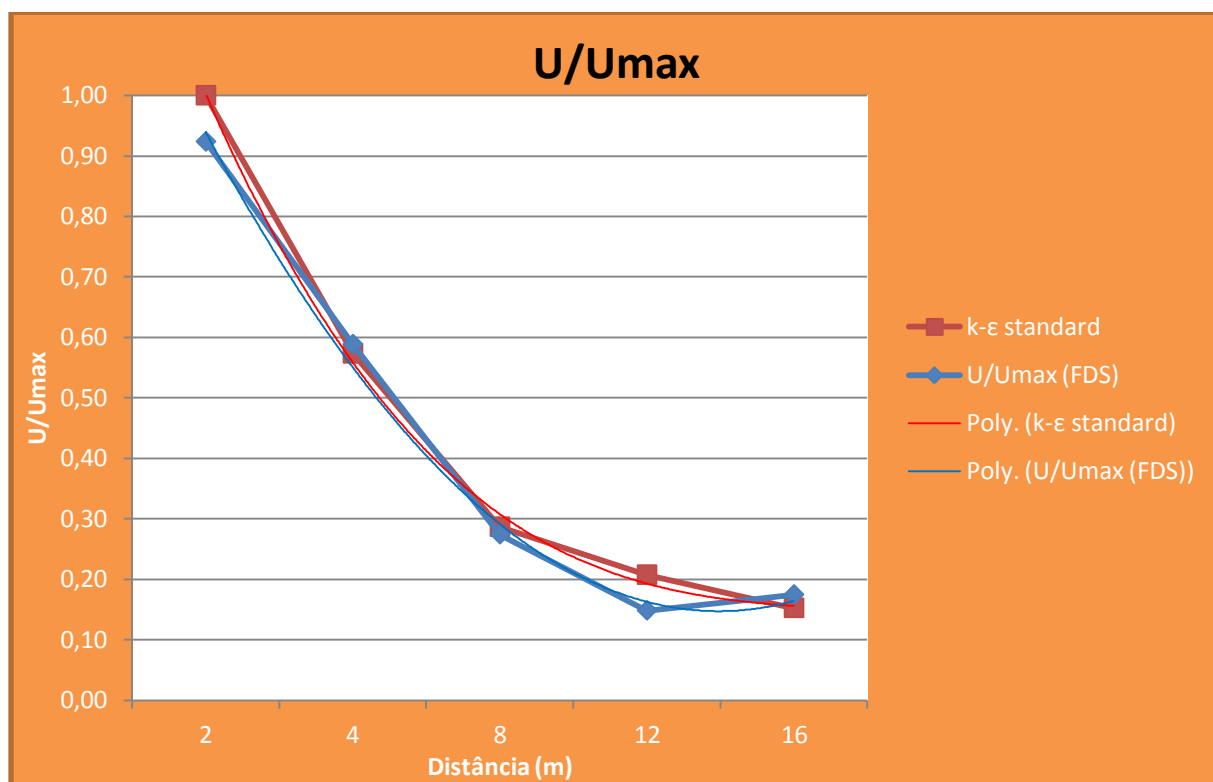


Figura 11 -Evoluções da velocidade nas diferentes simulações

Olhando para o gráfico pode-se concluir que as evoluções são bastantes próximas e até apresentam valores que na prática são quase idênticos, quer num plano mais próximo da superfície de saída, quer num plano mais afastado. A simulação realizada no programa *FDS* é uma simulação em que no final apresenta um pequeno aumento da velocidade e isso deve estar associado ao facto de na medição de velocidade à distância de 12m, deveria ser efectuada com um plano de medição com uma secção 2x4m e na realidade tinha 2.5x4m, o que faria baixar um pouco a média de velocidade, logo o ponto no gráfico está mais abaixo quando deveria ser um valor de velocidade um pouco mais elevado.

### 9.4.3. Sumário Final

Numa análise final à simulação do ventilador de impulso para poder avançar para a simulação do parque de estacionamento propriamente dito, pode-se concluir que em termos de velocidades ao longo do jacto do ventilador de impulso este programa (FDS) simula e aproxima bastante bem tendo em conta os dados consultados para uma situação em que o ventilador estaria a trabalhar na máxima carga, ou seja, numa situação de emergência. O gráfico abaixo corrobora o que foi dito já que em termos de velocidades médias absolutas pode-se verificar a aproximação notória entre a simulação em *FDS* usando o método LES (*Large Eddy Simulation*) e a situação real obtida no trabalho consultado.

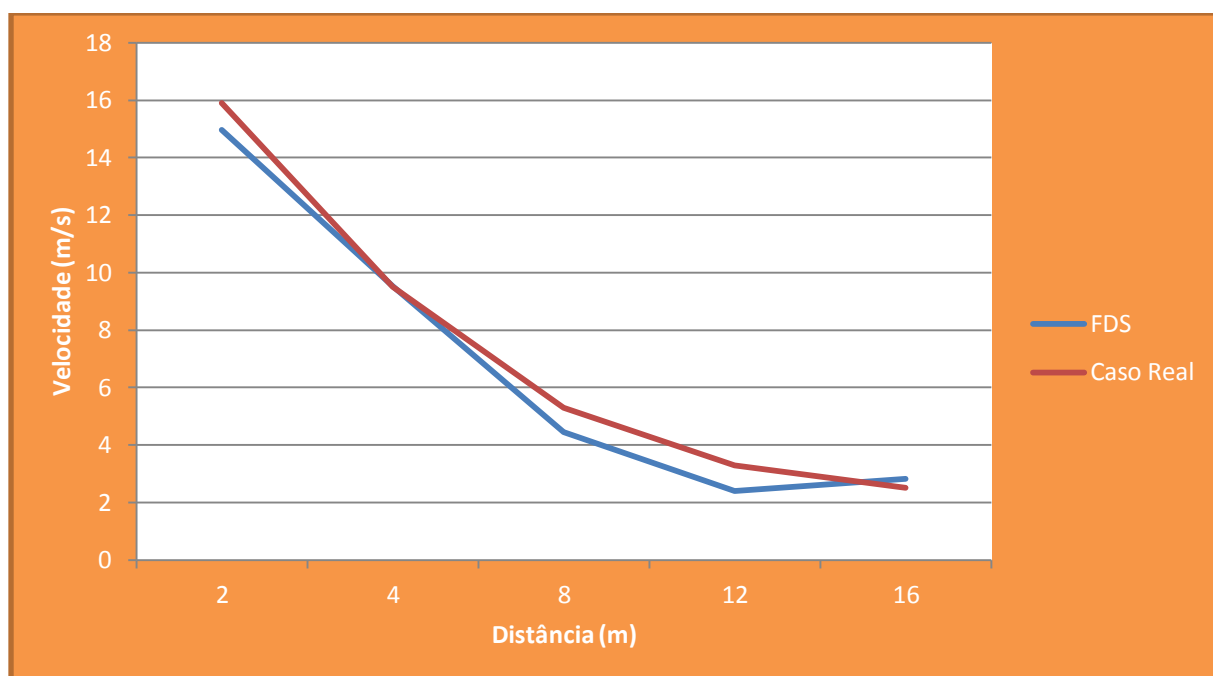


Figura 12 - Comparação das velocidades do ventilador de impulso real e da simulação

## 10. Retail Parque Oeiras

### 10.1. Introdução

O Parque Oeiras é um centro comercial que serve o concelho de Oeiras desde 1998, ou seja, já é um edifício com algum tempo, e daí a necessidade de evoluir e ampliar o centro comercial. O trabalho vai incidir não no edifício já existente mas sim no edifício em construção no ano presente, mais propriamente no Retail que vai tornar este shopping num dos maiores em Portugal.



Figura 13 – Entrada do Parque Oeiras

O objectivo do trabalho será analisar este Retail que está em construção e verificar os escoamentos do ar no seu interior, de modo a verificar se existem zonas críticas no escoamento e como se poderia melhorar e evitar estas zonas.

za



Figura 14 - Vista de satélite da localização do Parque Oeiras



### 10.1.1. Edifício Principal

Em seguida irão ser enumerados alguns dados sobre o edifício existente:

**Designação:** Oeiras parque

**Tipo de sociedade:** Sociedade Anónima

**Posicionamento:** O Shopping da Linha

**Número de pessoas que emprega:** cerca de 1500

**Área:** 129.000 m<sup>2</sup>, distribuídos por 4 pisos dos quais 2 são estacionamento

**Ficha Arquitectónica:**

**Arquitecto:** Atelier Vaz Pires; Cabeza & Sastre

**Constructor:** Engil

**Serviços Gerais:**

**Nº de restaurantes:** 39

**Nº de salas de cinema:** 7

**Nº de agências bancárias:** 3

**Nº de institutos de beleza:** 5

**Nº de lugares de estacionamento:** 2800



Figura 15 – Interior restauração



Figura 16 – Aspecto exterior



Figura 17 – Pormenor exterior

### 10.1.2. Edifício em Construção

O centro comercial Oeiras Parque, integrado na área multifuncional do Plano de Pormenor da Quinta da Fonte, à entrada de Oeiras vai proceder à actualização da sua imagem interior e exterior e à ampliação da área de vendas e da oferta comercial. A Mundicenter, empresa que promoveu e que explora o OeirasParque, convidou a CPU Retail Architects para realizar o projecto de renovação e de ampliação do OeirasParque.



Figura 18 – Imagem robot exterior

A intervenção permitirá redefinir e otimizar o layout e as circulações interiores do Centro Comercial, com particular incidência na criação de uma nova e funcional área de restauração, que se prolonga por uma esplanada exterior com vistas desafogadas para poente e para a Serra de Sintra.

O edifício é constituído por cinco pisos, em que três deles são de estacionamento e os restantes são para lojas, restauração, etc. A análise vai ser realizada a uma das duas zonas de fogo do piso -3, dado que a separá-las existe portas corta-fogo que em caso de incêndio tem como obrigação fechar não permitindo a ligação entre elas.



Figura 19 - Imagem Robot do novo Retail a ser construído



### 10.1.3. Ventilador de Impulso possivelmente adoptado no Parque

O ventilador de impulso que será possivelmente adoptado para implantar no parque será o modelo **THT/IMP-R-REV-38-2/4T-2** produzido na empresa *Mecano Técnica, Lda* do tipo armação rectangular podendo ser reversível ou unidireccional consoante a sua posição na planta. Os ventiladores reversíveis seriam aqueles colocados nas rampas de acesso aos pisos, para que em função da localização do incêndio (num dos pisos) seja possível escolher qual a direcção do escoamento que se pretende induzir.

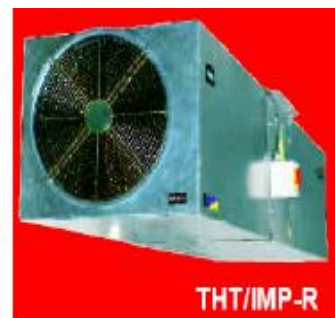


Figura 20 – Ventilador de impulso

As características principais do ventilador são as seguintes:

Características técnicas								
Modelo	Velocidade (r/min)	Intensidade máxima admissível (A) 400V	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Impulso (N)	Velocidade de Impulso m/s	Potência Instalada (kW)	Nível de pressão sonora dB(A)	Peso aprox. Kg.
THT/IMP-R-REV-38-2/4T-2	2935/1450	3,80/1,20	8200/4100	54/14	20,1/10,0	1,50/0,37	49/43	141,0

Figura 21 - Dados técnicos do ventilador de impulso adoptado

As dimensões associadas do ventilador em mm serão:

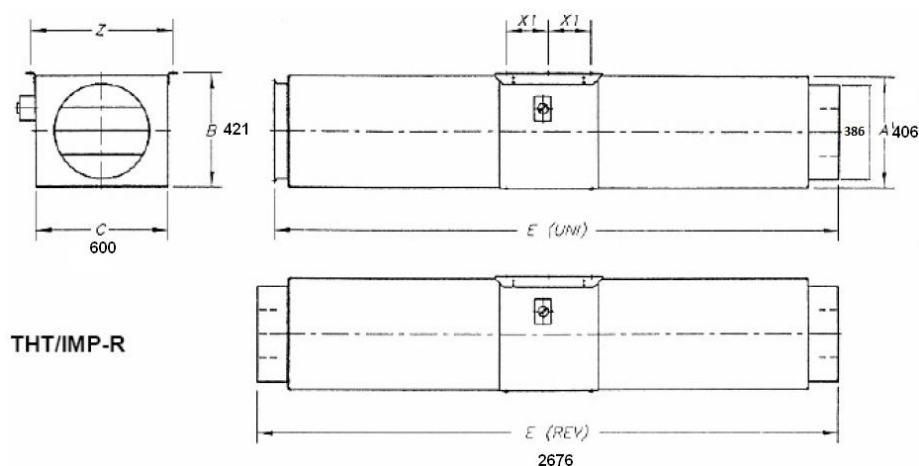


Figura 22 - Geometria do ventilador de impulso adoptado

Para efeitos de simulação, já que o programa não permite criar superfícies circulares, optou-se por calcular o diâmetro hidráulico associado e posteriormente verificar qual o diâmetro rectangular correspondente.

### Cálculo do diâmetro hidráulico

Ventiladores adoptados:  $\phi_{Ventilador} = 386 \text{ mm}$

$$D_H = \frac{4 \times A(\text{área})}{P(\text{perímetro})} \quad \text{Para um tubo: } D_H = D \quad \text{Para secção quadrada: } D_H = l$$

Tubo:  $D_H = D = 386 \text{ mm}$

Para o CFD:  $386 = D \Leftrightarrow l = 386 \text{ mm}$

Sendo assim para a simulação do ventilador de impulso foram adoptadas as seguintes medidas aproximadas:

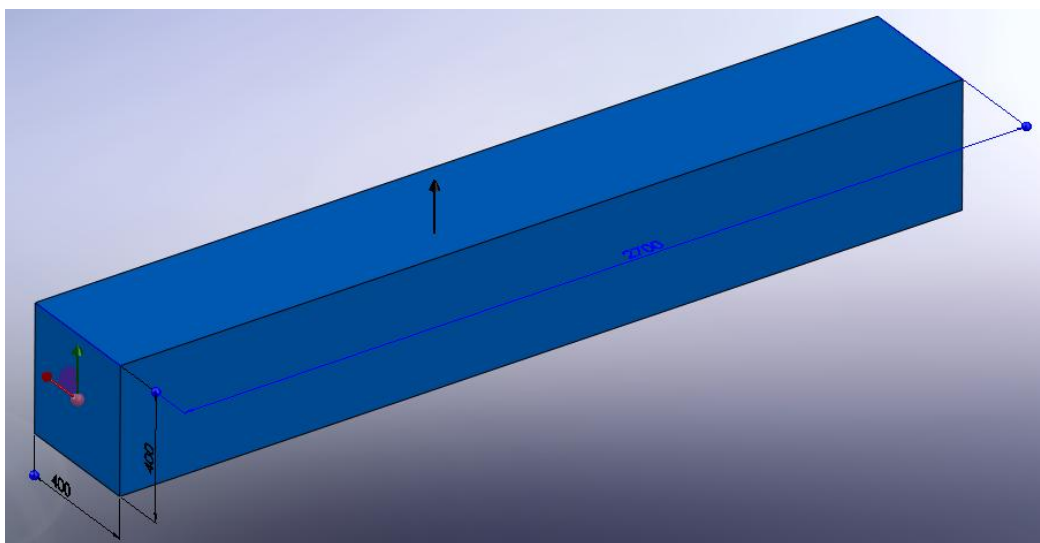


Figura 23 - Geometria do ventilador de impulso no programa de simulação

Após se ter definido as dimensões do ventilador a modelar foram desenhadas as superfícies exteriores do ventilador e no centro foi definida uma outra superfície que corresponde ao ventilador propriamente dito. Foi nesta superfície que foi considerada a condição de fronteira de velocidade imposta na superfície.

Tal como dito no parágrafo acima foi criada uma superfície sem espessura centrada no corpo do ventilador com o objectivo de inserir a velocidade de impulso, que como indicado nas características dos ventiladores é de 20,1 m/s.

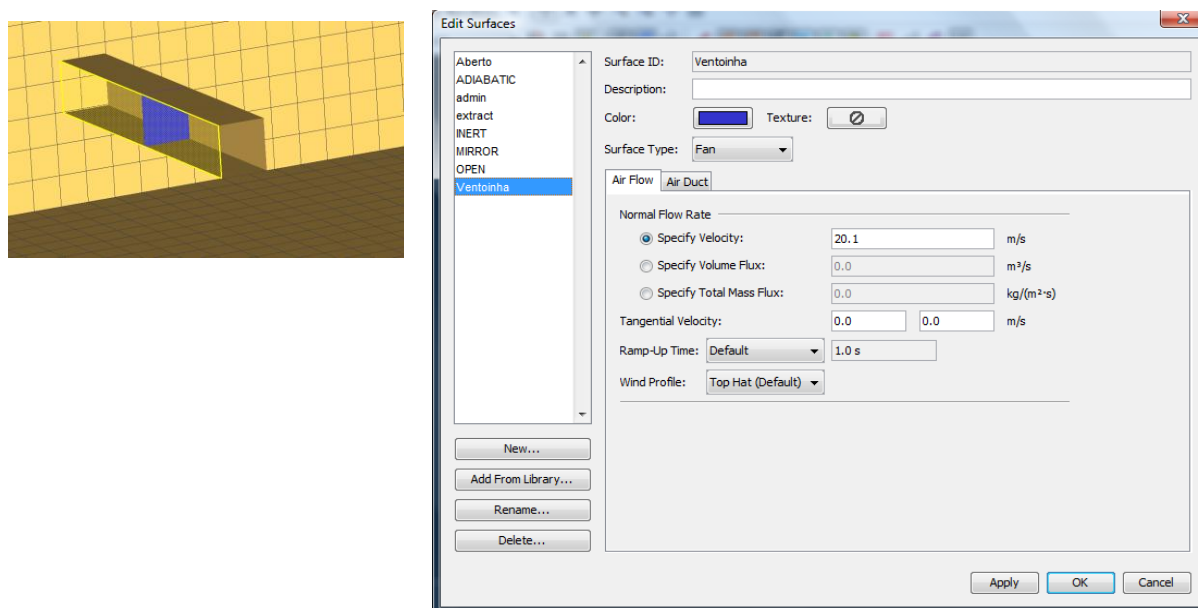


Figura 24 - Condição de fronteira imposta no programa FDS

A simulação foi realizada e os resultados obtidos em termos de campo de velocidades foram coerentes com os realizados nas simulações de comparação mas agora com dados diferentes.

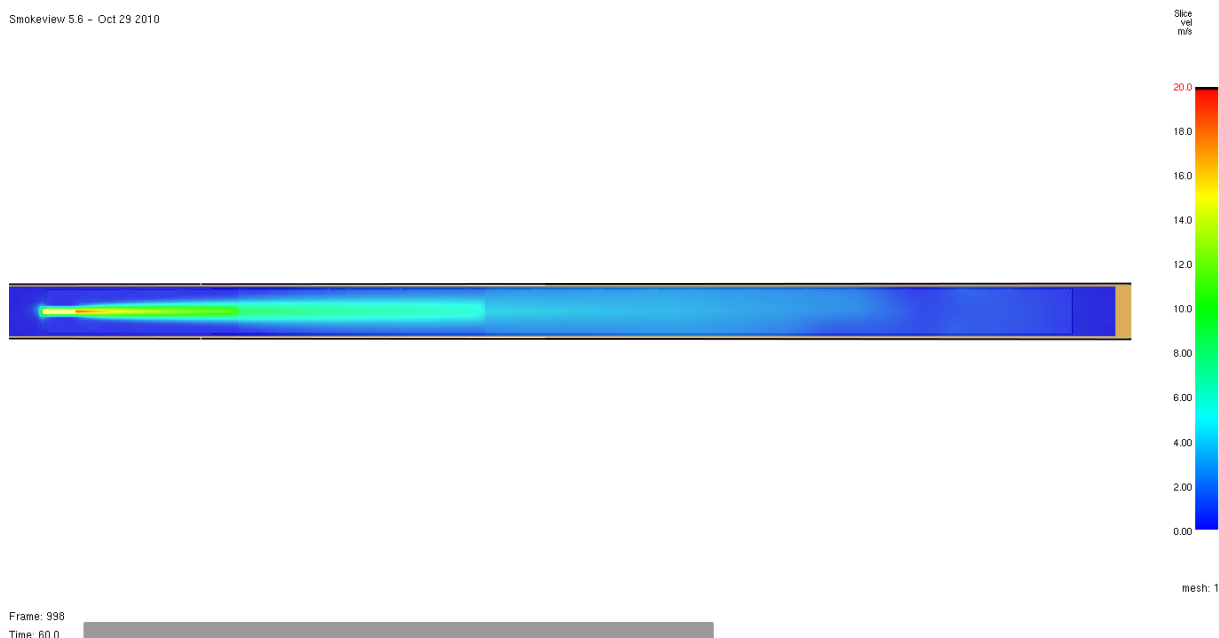


Figura 25 - Campo de velocidades do ventilador de impulso possivelmente adoptado no parque

## 10.2. Modelação do Parque em 3D

Para a realização do estudo do escoamento do ar no interior do parque de estacionamento foi necessário desenhar a três dimensões e à escala, todo o piso -3 e as suas duas zonas de fogo. Para isso foi utilizado um software de nome *PyroSim* que permite importar a planta do edifício de um ficheiro do tipo .DWG compatível com o *AutoCad* e em seguida sabendo o pé-direito pode-se gerar a geometria final a estudar.

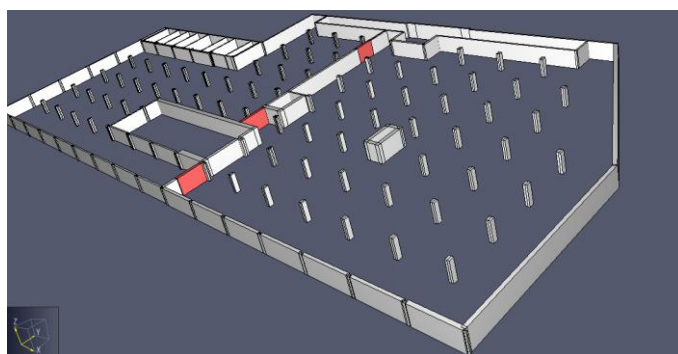


Figura 26 - Geometria 3D do piso -3

Como já foi dito anteriormente para o cálculo foi só considerado uma das duas zonas de fogo que estão separadas pelas portas corta-fogo que na figura 20 estão representadas a vermelho. Considerando a mesma figura pode-se identificar as várias vigas de suporte da estrutura assim como as zonas que estão fechadas (zonas de arrumos ou de acesso a escadas) ou que em caso de incêndio (e.g. acesso a outros pisos) são isoladas por portas corta-fogo.



Figura 27 - Imagem ilustrativa do parque com os veículos estacionados no seu interior

Nas figuras acima pode-se verificar os pormenores da geometria dos carros, que neste trabalho foram considerados todos iguais nas suas dimensões, e a sua distribuição foi baseada na distribuição real obtida através da planta do piso.

Os carros têm 4m de comprimento, 2m de largura e 1.5 de altura, tendo sido desenhados através de dois paralelepípedos rectangulares de 4.0x2.0x1.00m e outro de 2.0x2.0x0.5m.

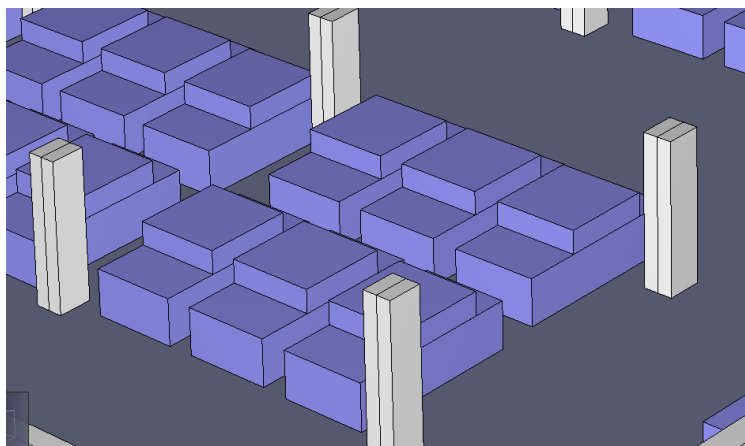


Figura 28 - Pormenor do parque ilustrando a geometria dos veículos

Na zona de corta-fogo em estudo existe uma zona de admissão de ar e outra de extracção, que estão assinaladas com a cor verde na figura abaixo, e são nestas zonas que vão ser inseridas as condições de fronteira adequadas a simular os ventiladores axiais de admissão e extracção. Estas condições de fronteira são calculadas através de regras definidas na legislação e nas normas adoptadas por cada país, daí na introdução ter sido feita uma comparação entre a legislação portuguesa e a norma britânica. Foram admitidas condições de velocidade imposta nas superfícies a verde de 2 m/s, definido na norma britânica como máximo admissível e foi calculado então uma área de superfície de insuflação e extracção tendo em conta o caudal de ar calculado através da norma.

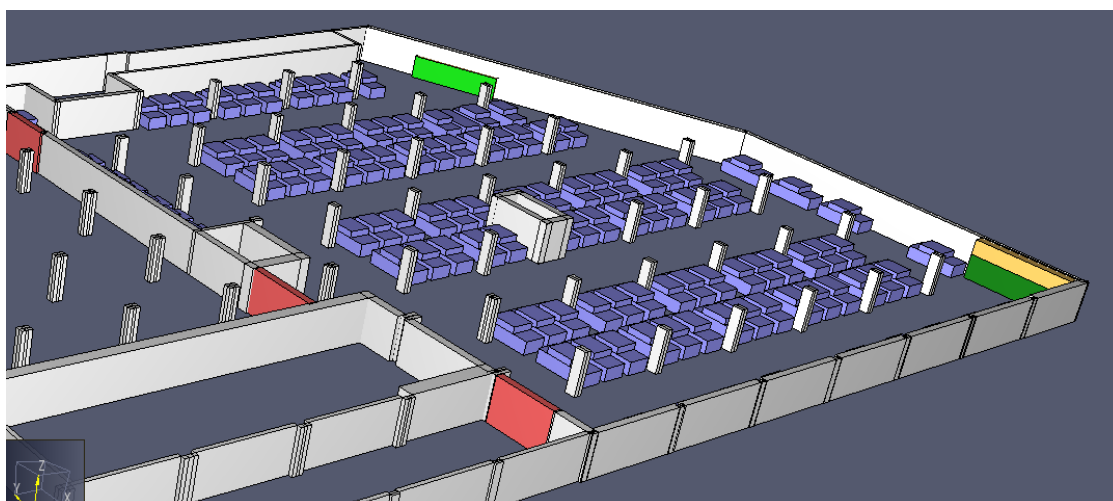


Figura 29 - Imagem ilustrativa das superfícies de admissão e extracção

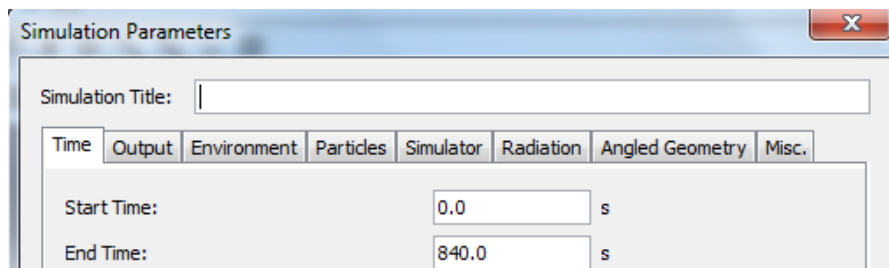
### 10.2.1. Parâmetros de simulação inseridos

Para as várias simulações vão ser enunciados os vários parâmetros relevantes que foram considerados e sua visualização no programa.

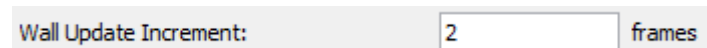
#### TIME

Start time 0.0s

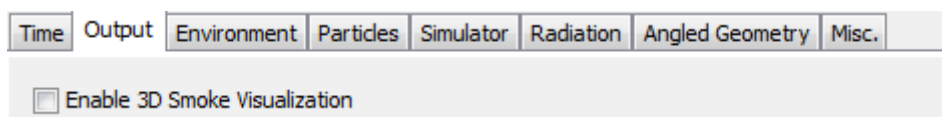
End time: 840s



*Wall update increment 2 frames* - resolve as temperaturas das paredes a cada 2 intervalos de tempo.



#### OUTPUT



*Enable 3D Smoke visualization*- depende da simulação (se se pretende visualizar o escoamento do fumo)

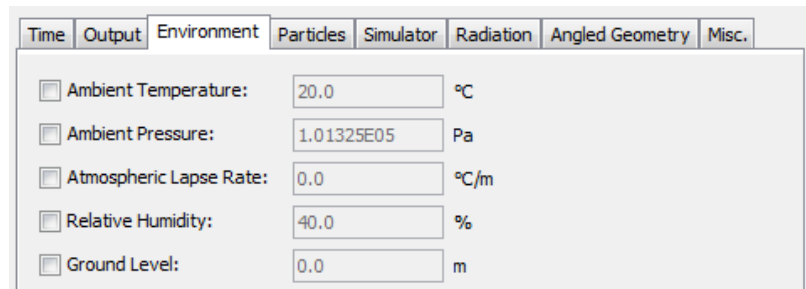
## ENVIRONMENT

Temperatura ambiente – 20°C

Pressão atmosférica – 101325 Pa

Humidade relativa – 40%

Nível de solo – 20 (foi desprezado)



The screenshot shows the 'Environment' tab of a simulation software. It contains five input fields, each with a checkbox to its left:

- ☐ Ambient Temperature: 20.0 °C
- ☐ Ambient Pressure: 1.01325E05 Pa
- ☐ Atmospheric Lapse Rate: 0.0 °C/m
- ☐ Relative Humidity: 40.0 %
- ☐ Ground Level: 0.0 m

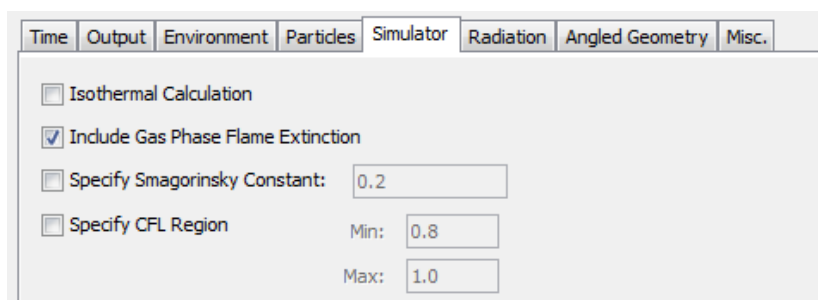
Velocidade inicial do vento - 0 m/s em x,y,z

Gravidade:  $Z = -9,81 \text{ m/s}^2$

## SIMULATOR

*Specify Smagorinsky Constant* = 0,2 (quanto mais pequeno melhor para manter a estabilidade numérica)

*Specify CFL region* (Courant-Friedrichs-Lewy)



The screenshot shows the 'Simulator' tab of a simulation software. It contains several options and input fields:

- ☐ Isothermal Calculation
- ☒ Include Gas Phase Flame Extinction
- ☐ Specify Smagorinsky Constant: 0.2
- ☐ Specify CFL Region
  - Min: 0.8
  - Max: 1.0

As velocidades estimadas  $u^{(n+1)}$ ,  $v^{(n+1)}$  e  $w^{(n+1)}$  são testadas cada intervalo de tempo para assegurar que a condição CFL seja satisfeita, embora este parâmetro não tenha sido alterado ficando o parâmetro por defeito.

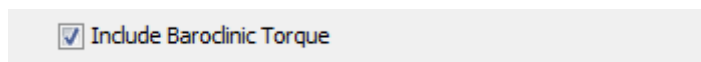
Se não for satisfeito o intervalo de tempo passa a 0,8 vezes o valor máximo e as velocidades estimadas são recalculadas e verificadas novamente.

A condição CFL impõe que solução das equações não possa ser actualizada com um intervalo de tempo maior que 0,8 vezes o valor máximo permitindo assim que uma parcela de fluido atravesse os elementos da malha.

*Specify Von Neumann Region* – só se aplica para soluções do tipo DNS ou para LES mas em que a malha tem de lado menos de 5mm.



*Include baroclinic torque* – responsável por gerar vorticidade devido ao desalinhamento entre os gradientes de pressão e massa volúmica.



*Specify Schmidt number* – 0.5 (valor de referência existente no programa)

*Specify Prandtl Number* – 0.5 (valor de referência existente no programa)

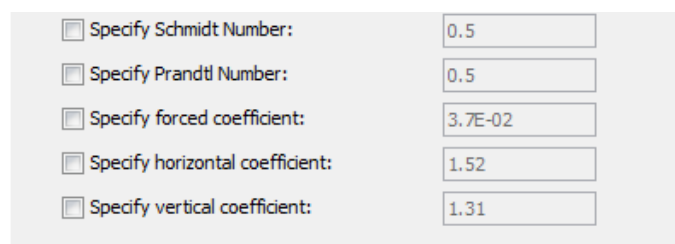
Os dois valores acima adoptados têm influencia no comportamento difusivo do jacto do ventilador, considerando-se como mais adequados valores para n° de Schmidt entre 1 e 16 , e para o n° de Prandtl da ordem de 0,7.

São assumidas constantes e foram obtidas por testes experimentais.

Forced coefficient =  $3,7 \times 10^{-2}$  (coeficiente de convecção forçada)

Horizontal coefficient = 1,52 (coeficiente de convecção natural para uma superfície horizontal)

Vertical coefficient = 1,31 (coeficiente de convecção natural para uma superfície vertical)





### 10.3. Análise de Escoamentos

Antes de serem apresentados os resultados das várias simulações vai ser demonstrada a malha usada para o parque de estacionamento em estudo. Na totalidade apenas existiam três tamanhos distintos de malha sendo estes de  $0.25 \times 0.25 \times 0.25$ ,  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  e  $1 \times 1 \times 0.5$  e estão localizadas no parque tendo em conta o detalhe existente em cada zona do parque, por exemplo na zona dos veículos, admissão e extração de ar, ventiladores de impulso, a malha é mais refinada para capturar adequadamente o escoamento. Embora nas primeiras simulações ainda não estejam representados quer a ventilação de impulso, quer os veículos, a malha adoptada foi a mesma em todas as simulações.

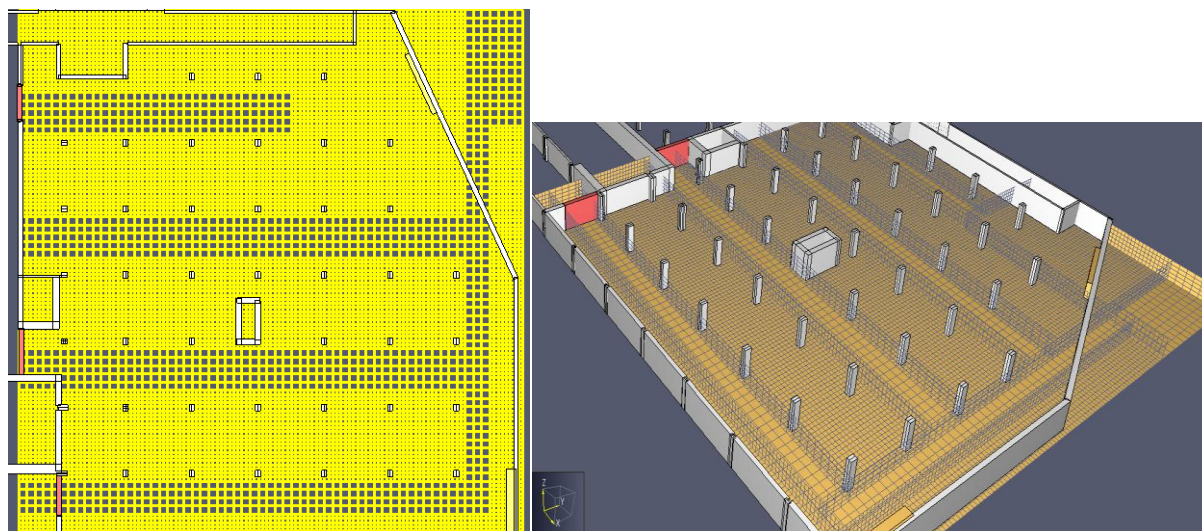


Figura 30 - Malha usada na simulação

Os caudais adoptados nas simulações quer para admissão, quer para a extracção foram os calculados num capítulo da introdução, onde foram comparadas a legislação portuguesa e a norma inglesa. O caudal de admissão adoptado para todas as simulações foi de  $72000 \text{ m}^3/\text{h}$  e como foi considerada uma condição de fronteira de velocidade imposta teve que se calcular a área de admissão equivalente para esse caudal.

$$V = 7200 \text{ m}^3/\text{h} \quad v = 2 \text{ m/s} \text{ (velocidade definida na norma como velocidade máxima)}$$

$$V = S \times v \Leftrightarrow S = \frac{V}{v} \Leftrightarrow S = \frac{20}{2} \Leftrightarrow S = 10 \text{ m}^2$$

As dimensões adoptadas para a superfície de admissão foram de  $5 \times 2 \text{ m}$ .

### 10.3.1. Ventilação de impulso desligada (Com/sem veículos)

Para verificação do efeito da presença de veículos no interior do parque procedeu-se a uma simulação sem e outra com veículos no seu interior. A zona de corta-fogo simulada apresentava lugar para 118 veículos estacionados em zonas onde poderiam estar rodeados e zonas onde estariam isolados dos outros veículos. Para facilitar a visualização dos resultados foi utilizado o program Smoke View e foram verificados os campos de velocidade do ar a 1.5m de altura, sendo que os resultados obtidos foram os seguintes:

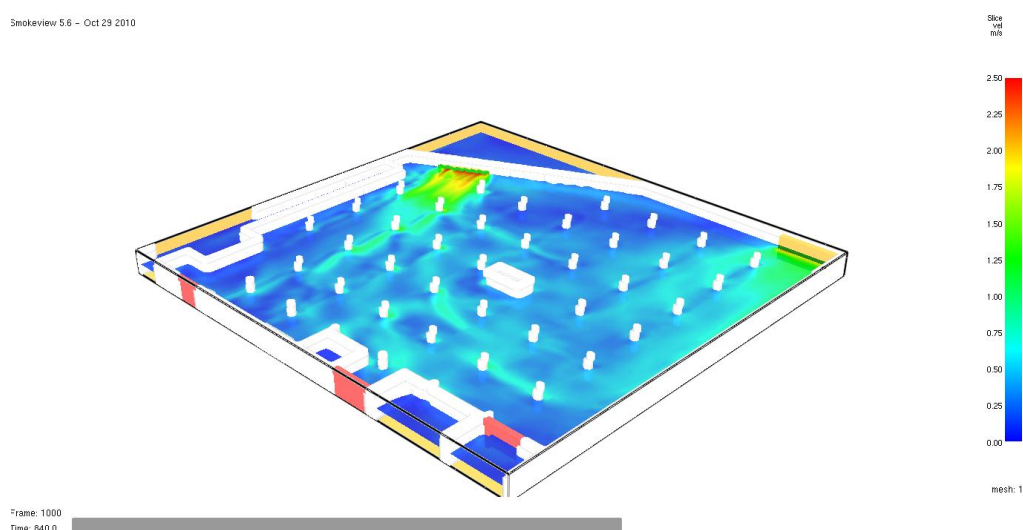


Figura 31 - Campo de velocidades no plano  $z=1.5m$  sem veículos no interior do parque

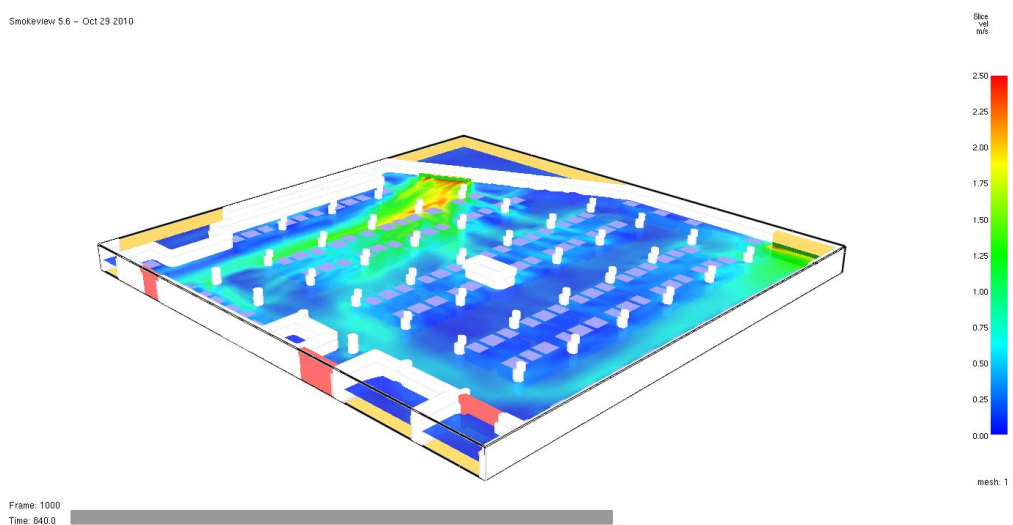
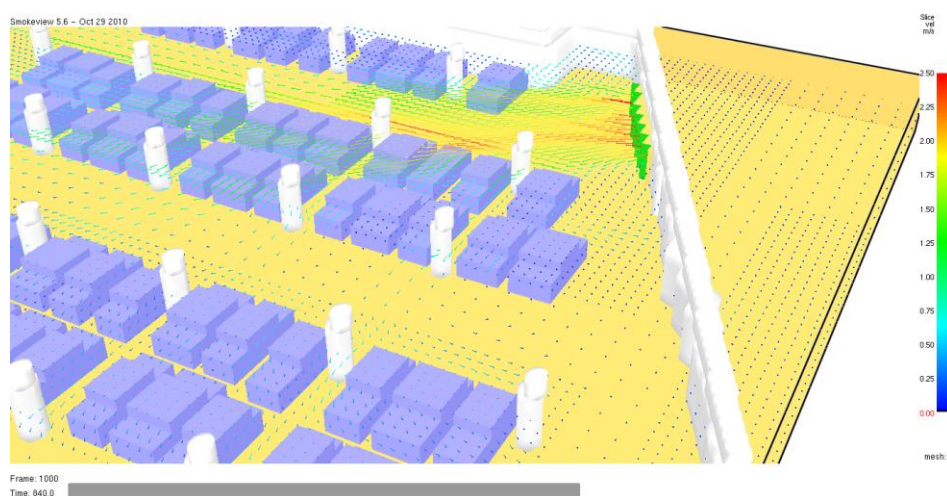


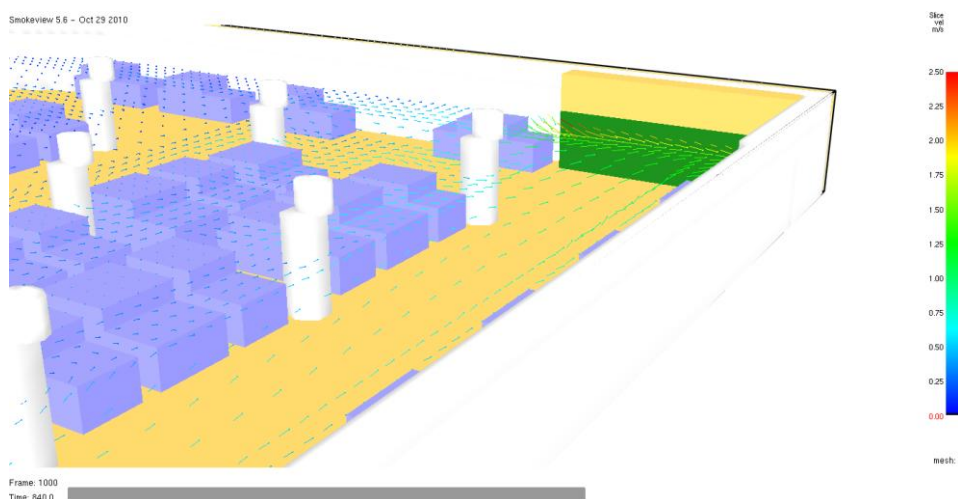
Figura 32 - Campo de velocidades no plano  $z=1.5m$  com veículos no interior do parque

Olhando para os dois campos de velocidade pode-se verificar uma pequena alteração do escoamento, nomeadamente uma zona em que a velocidade é menor devido ao facto de os carros estarem a criar uma resistência ao escoamento e o ar ter de alterar um pouco a sua trajectória e ter de aumentar a sua velocidade nas zonas de circulação dos veículos onde não existe qualquer resistência ao escoamento. Tendo em conta estes resultados pode-se já concluir a importância de modelar os veículos no interior do parque já que vão influenciar o escoamento do ar de uma forma significativa.

Outro aspecto relevante que se pode verificar nos resultados corresponde à análise dos vectores velocidade e a sua direcção nas várias zonas do parque.



**Figura 33 - Campo vectorial de velocidades no plano  $z=1.5\text{m}$  na zona de admissão**



**Figura 34 - Campo vectorial de velocidades no plano  $z=1.5\text{m}$  na zona de extracção**

Olhando para as imagens da página anterior, verificando a direcção dos vectores velocidade e cruzando a informação com a figura 25, pode-se concluir que a deslocação do ar no interior do parque está a ser realizada com intuito de o ar entrar na zona de admissão, percorrer o parque não criando zonas significativas de estagnação e sempre direccionado ao ponto de extracção como a figura 27 indica.

### 10.3.2. Ventilação de impulso ligada

Para verificar a influência da ventilação de impulso no escoamento no interior do parque foram então colocados todos os ventiladores de impulso definidos no projecto do parque nas suas posições estabelecidas, como indicado na figura 28.

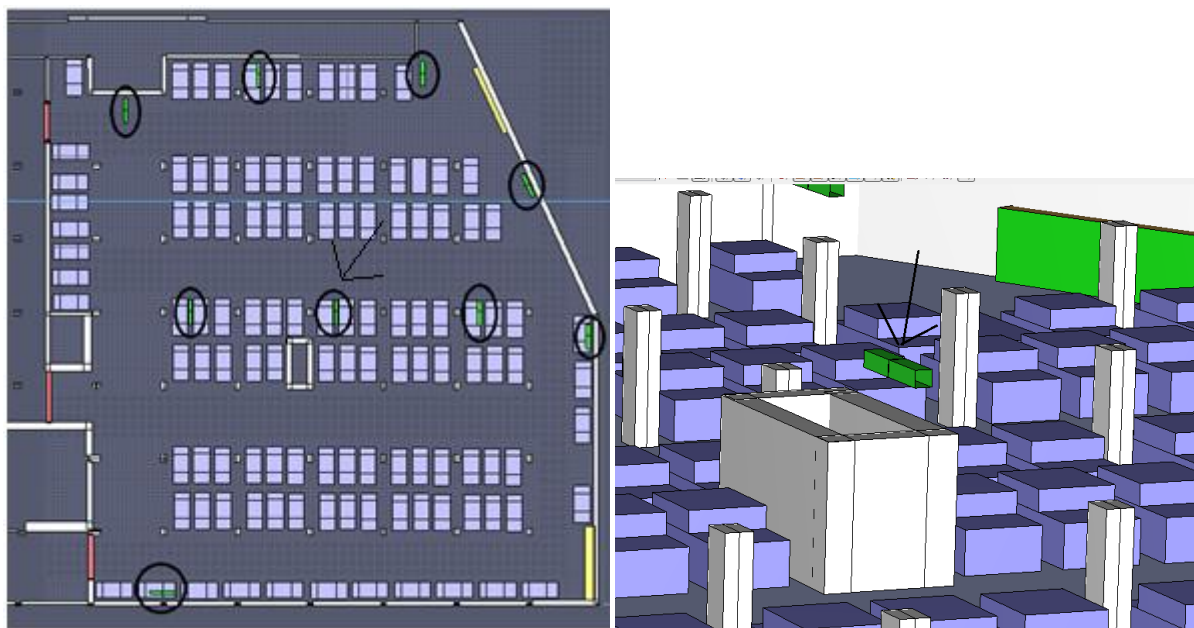


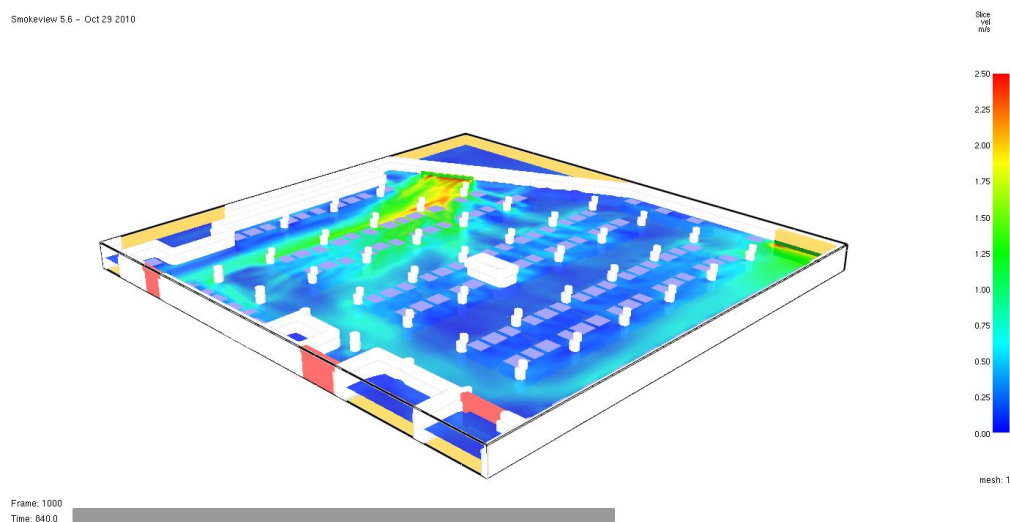
Figura 35 - Posições dos ventiladores de impulso e pormenor de um dos equipamentos

Todos os ventiladores de impulso foram modelados da mesma forma, tal como indicado anteriormente no capítulo 12.1.3 com a condição de fronteira de velocidade imposta de 20.1m/s na superfície interior. De seguida vão ser ilustradas imagens que demonstram a turbulência induzida pelos ventiladores de impulso no interior do parque em relação ao campo de velocidades estudado anteriormente que correspondia a não existir ventilação de impulso.

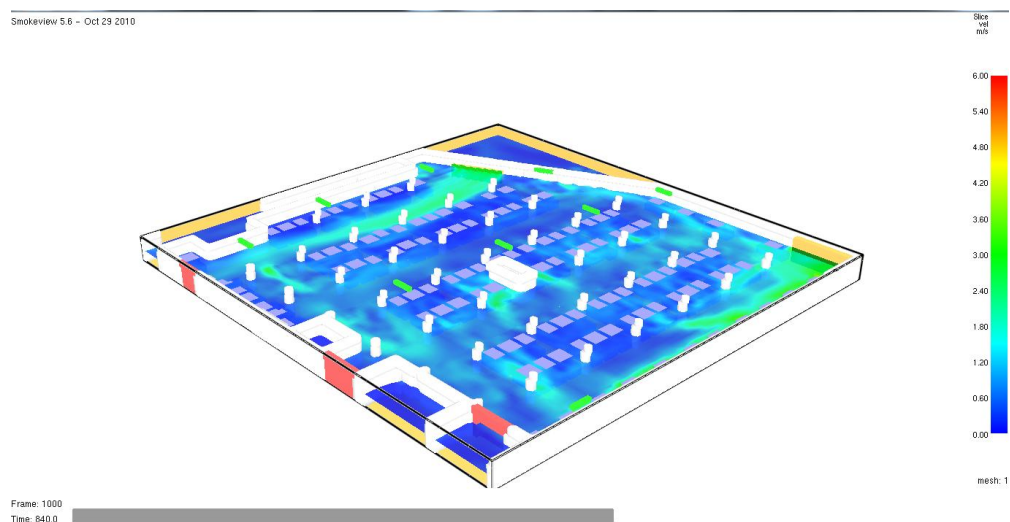
Todas as simulações podem ser comparadas pois todas tiveram a sua origem num ficheiro comum mais simples, ou seja, todos os parâmetros de simulação são idênticos em todas as simulações, apenas varia a inserção de mais equipamentos e de mais condições de fronteira que vão tornando cada vez mais complexa a simulação, até chegar a uma simulação final do parque de estacionamento numa situação de emergência.



As figuras 29 e 30 representam os campos de velocidade num plano à cota de 1.5m, em que no primeiro caso não há ventilação de impulso e no segundo já existe.



**Figura 36 - Campo de velocidades no plano  $z=1.5\text{m}$  sem ventilação de impulso**



**Figura 37 - Campo de velocidades no plano  $z=1.5\text{m}$  com ventilação de impulso**

Olhando para as figuras acima pode-se verificar que no caso onde não existia ventilação de impulso ocorrem mais zonas de estagnação, pois existe mais pontos com velocidade perto de 0, o que na figura 30 já não se verifica devido à presença da ventilação de impulso, que tem como um dos objectivos isso mesmo, criar turbulência no interior do parque de estacionamento.

A figura 32 ilustra o campo de velocidades no plano  $z=3\text{m}$  que permite verificar os jactos provocados pelos ventiladores de impulso no parque.

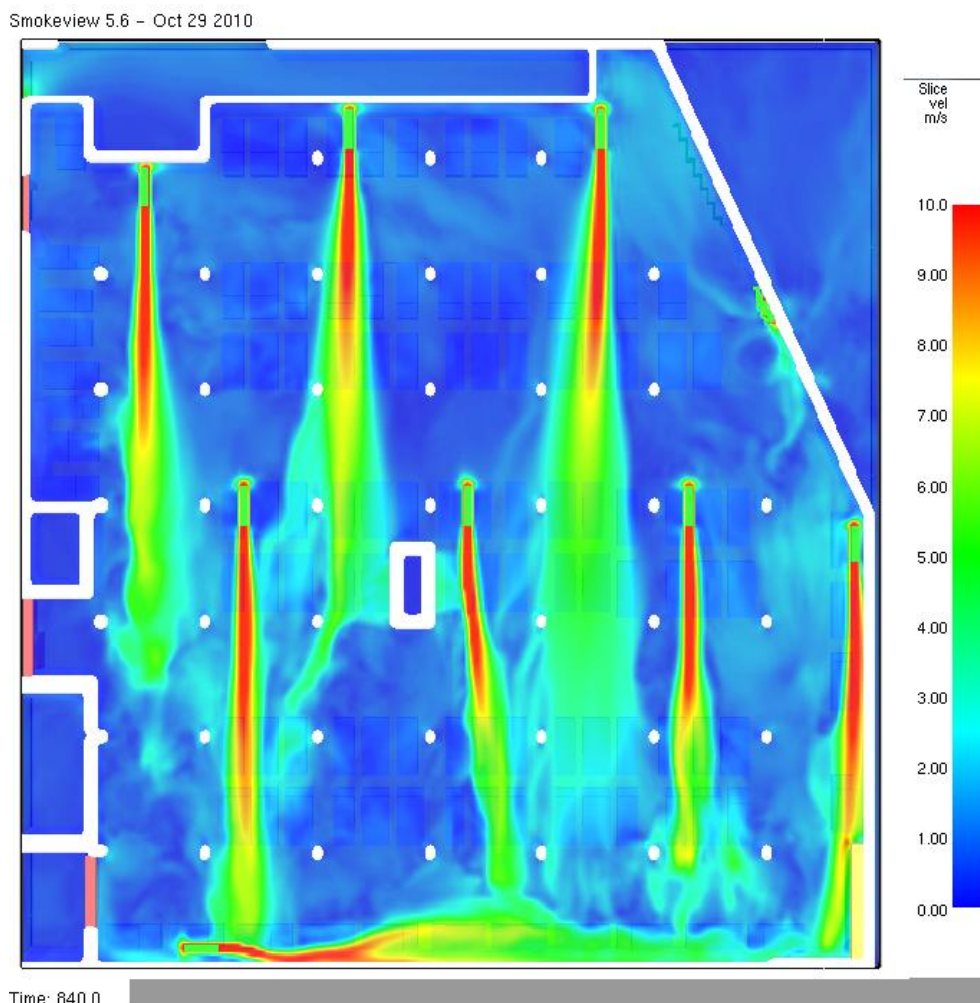


Figura 38 - Campo de velocidades no plano  $z=3\text{m}$  com ventilação de impulso

Olhando para a figura 32 pode-se verificar que a zona de maior turbulência está situada na zona de extracção, onde até existe a perturbação significativa do escoamento do ventilador de impulso mais abaixo da figura, isto porque estará a ser influenciado pelos outros ventiladores em funcionamento que criam jactos perpendiculares, o que vai alterar o jacto do ventilador colocado na zona inferior da imagem. Outro facto que se pode verificar é que um dos ventiladores de impulso nomeadamente o ventilador que está numa posição oblíqua não estará a ser bem simulado pois o seu escoamento é totalmente díspar dos outros, isto devido ao facto de o programa *FDS* ter dificuldades na modelação de superfícies oblíquas.

### 10.3.3. Simulação Final (inclui fonte de calor)

Para a simulação final foi considerada uma fonte de calor que seria o caso em que um veículo estaria em incêndio e para isso foi consultada a norma inglesa EN1201 que num dos seus capítulos fala de valores padrão de potências térmicas libertadas para veículos num interior de um parque de estacionamento. Tendo em conta que no parque estariam apenas veículos ligeiros o valor encontrado foi de 6 MW durante um período de 35 min. Para este caso foi calculado então o valor a inserir na superfície do veículo da potência libertada por metro quadrado.

$$P_{LIBERTADA} = 6 \text{ MW} \qquad \text{Área}_{VEÍCULO} = 2 \times 4 = 8 \text{ m}^2$$

$$P_{LIBER/m^2} = \frac{6}{8} = 0.75 \text{ MW/m}^2 = \mathbf{750 \text{ kW/m}^2}$$

Este valor de 750 kW/m<sup>2</sup> foi o valor inserido como condição de fronteira num veículo existente no parque de estacionamento, onde o seu posicionamento foi escolhido numa zona intermédia entre a zona de admissão e a zona de extracção, como indicado na figura 34. O tempo da simulação definido foi de 840s, ou seja, 14 minutos e a fonte de calor variável ao longo do tempo. Na realidade a simulação teria de ser mais prolongada dado que um veículo mantém-se em chamas durante mais tempo, mas para diminuir o tempo de cálculo computacional foi considerado menos tempo, que poderia ser uma situação ideal em que os *sprinklers* extinguissem rapidamente o fogo.

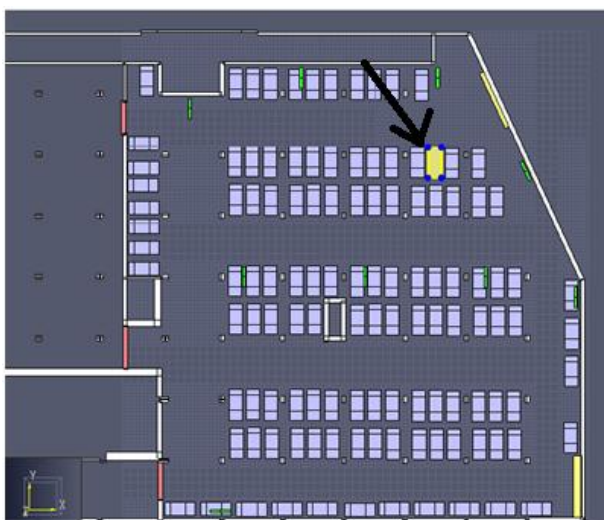


Figura 40 - Posição da fonte de calor

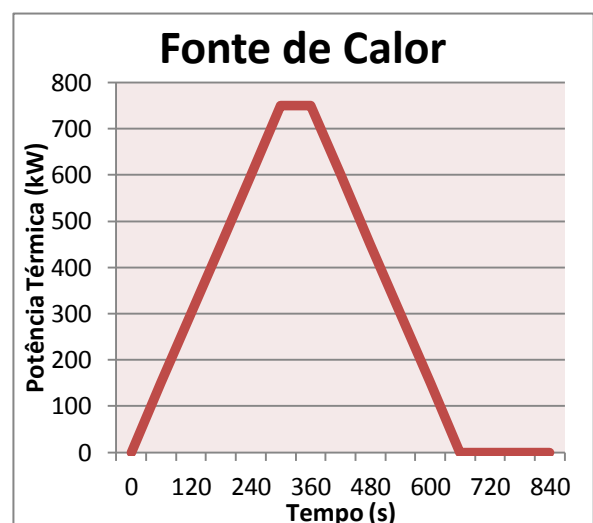


Figura 39 - Diagrama de potência térmica da fonte de calor ao longo do tempo



## *Campos de Velocidade*

Os campos que vão ser apresentados de seguida representam todos a velocidade do ar num plano à cota de 1.7m de altura para diferentes momentos na simulação.

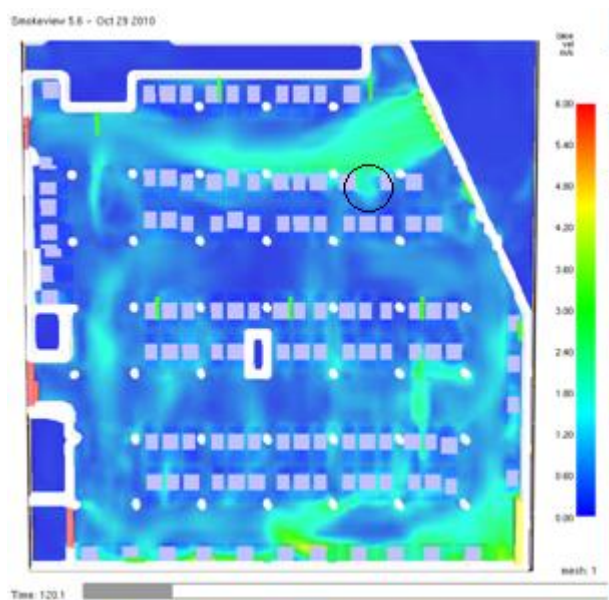


Figura 42 - Campo de velocidades no instante  $t=120s$

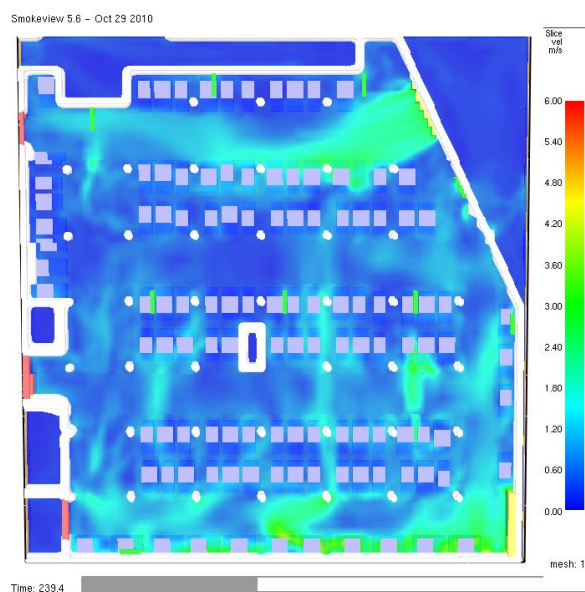


Figura 41 - Campo de velocidades no instante  $t=240s$

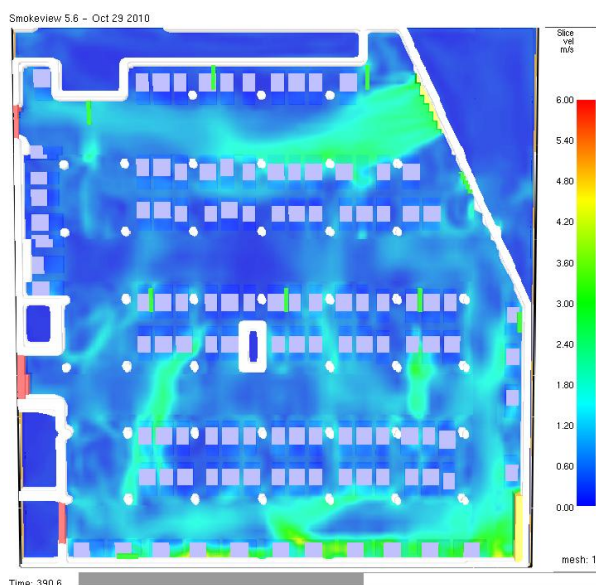


Figura 44 - Campo de velocidades no instante  $t=390s$

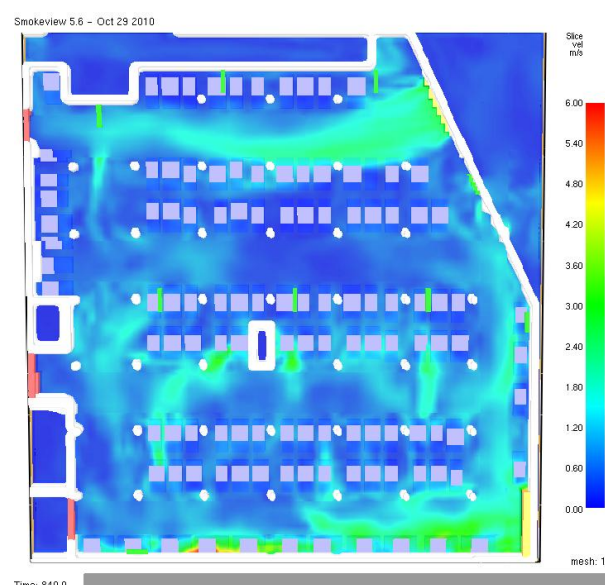


Figura 43 - Campo de velocidades no instante  $t=840s$

Ao analisar os diferentes campos de velocidade pode-se verificar que no instante final já não existe o foco de incêndio, ou seja, a perturbação no escoamento induzida pelo fogo já não se verifica, no entanto é de referir que a existência da fonte de calor vai induzir alguma turbulência que não se verificava anteriormente.

Os campos que vão ser apresentados de seguida representam todos a velocidade do ar num plano à cota de 3m de altura para diferentes momentos na simulação.

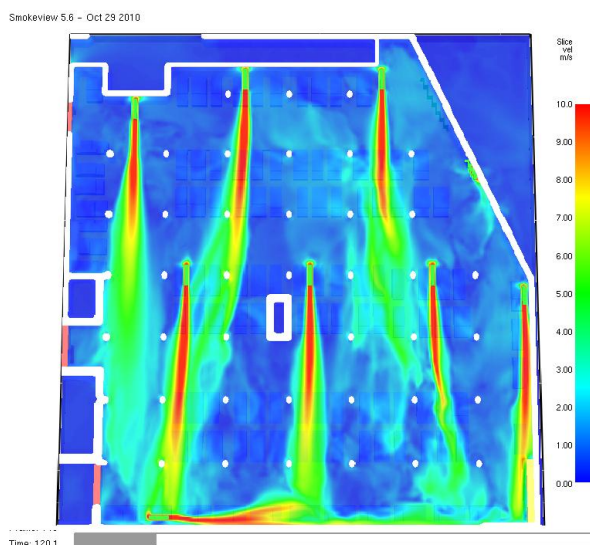


Figura 39 - Campo de velocidades no instante  $t=120s$

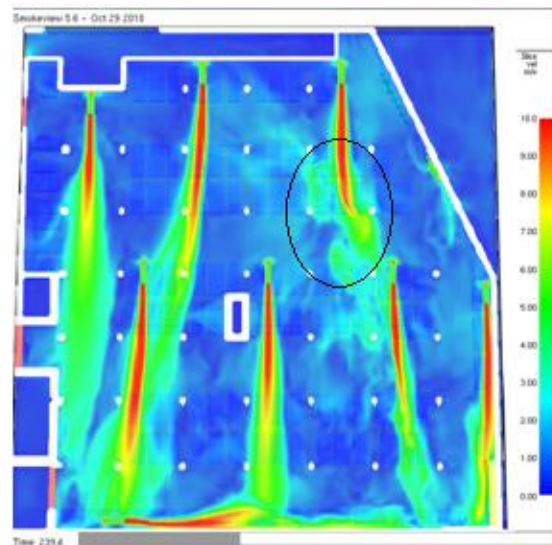


Figura 45 - Campo de velocidades no instante  $t=240s$

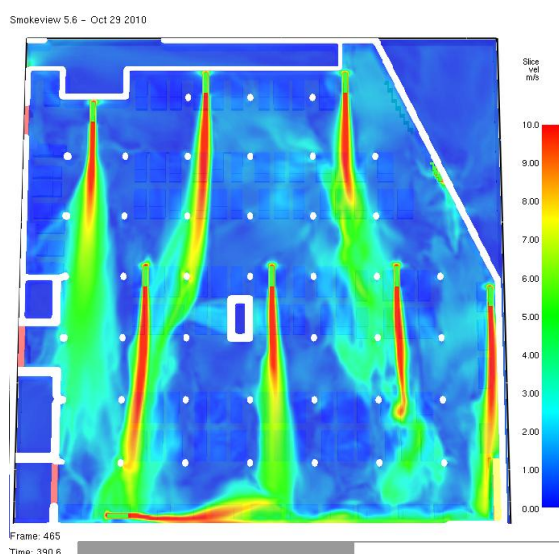


Figura 41 - Campo de velocidades no instante  $t=390s$

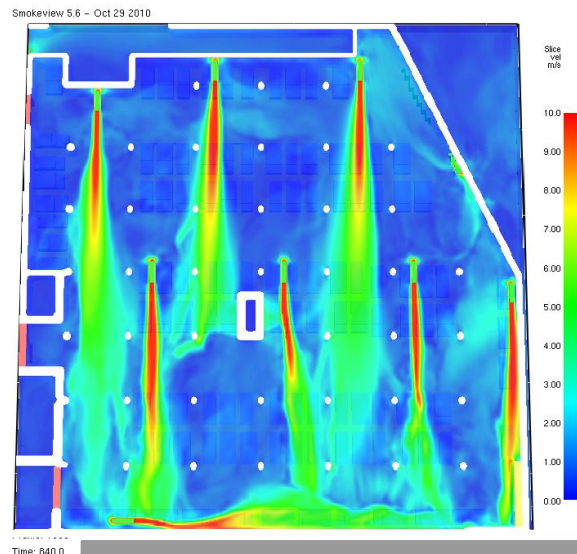


Figura 46 - Campo de velocidades no instante  $t=840s$

Olhando para as imagens acima pode-se verificar a presença do foco de incêndio devido à perturbação que provoca no escoamento principalmente de um dos ventiladores de impulso, tal como assinalado com uma bola preta na figura 40. Na figura 42 que representa o escoamento no instante final da simulação, dado que já não existe fonte de calor pode-se observar que também já não há perturbação no escoamento induzido pelo ventilador de impulso mais próximo do incêndio.

## Temperatura

As figuras seguintes representam a temperatura do ar num plano à cota de 2m de altura para diferentes momentos na simulação.

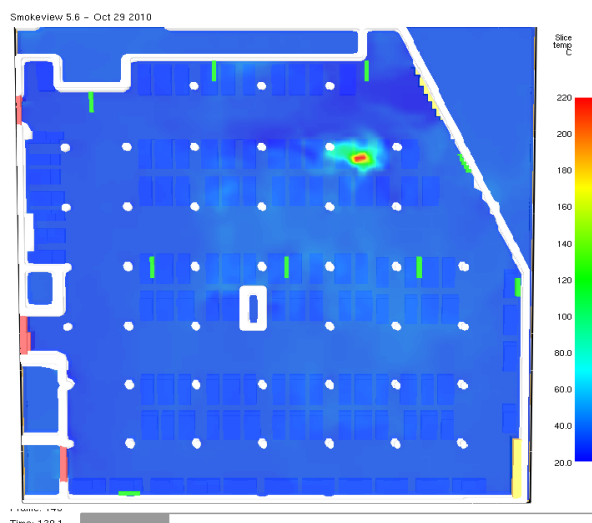


Figura 48 - Campo de temperaturas no instante  $t=120s$

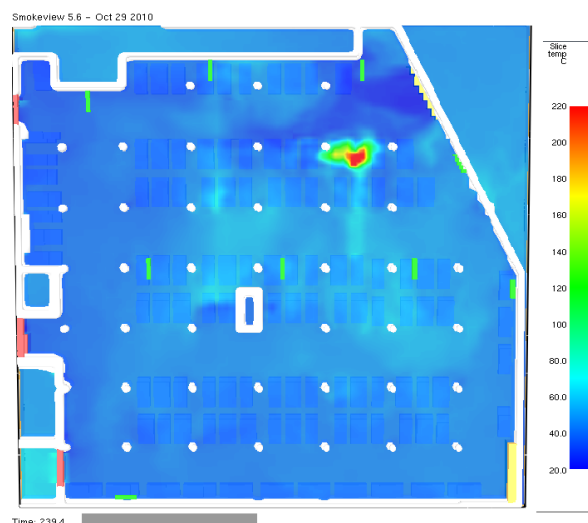


Figura 47 - Campo de temperaturas no instante  $t=240s$

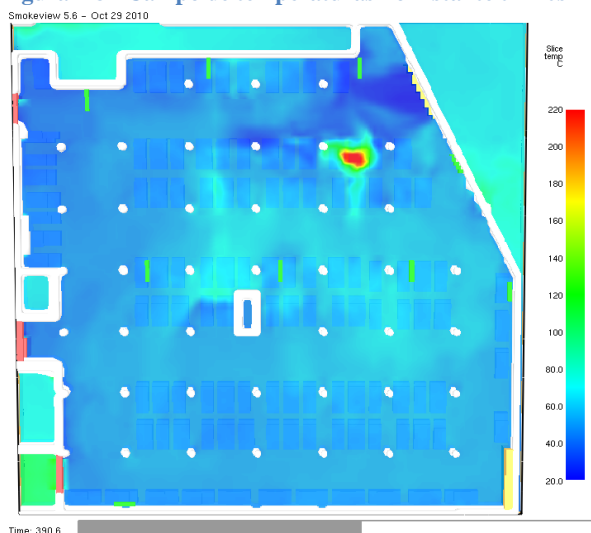


Figura 50 - Campo de temperaturas no instante  $t=390s$

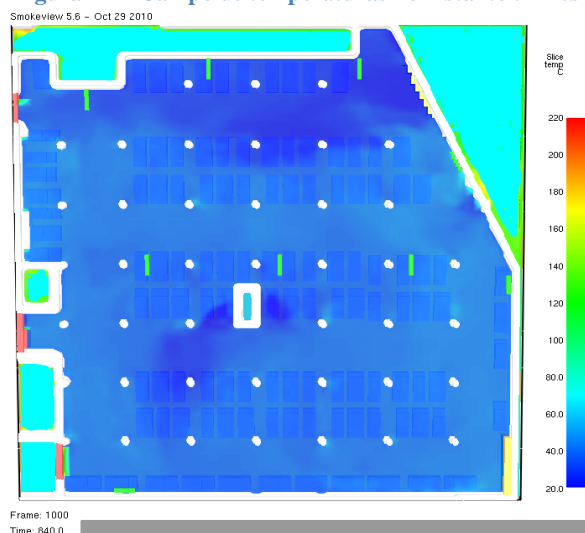


Figura 49 - Campo de temperaturas no instante  $t=840s$

Ao analisar as diferentes distribuições de temperatura pode-se verificar que ao fim de 2 minutos o fogo ainda está em desenvolvimento e a sua temperatura a aumentar, onde as temperaturas no restante do parque ainda estão relativamente baixas embora a aumentar, tal como ilustra a figura 43, aos 390s já se verifica um aumento da temperatura em algumas zonas do parque que em seguida com a extinção do fogo se verifica um abaixamento da temperatura, tal como indica a figura 46.



## Visibilidade

As figuras seguintes representam o indicador de visibilidade do ar num plano à cota de 1.7m de altura para vários momentos na simulação.

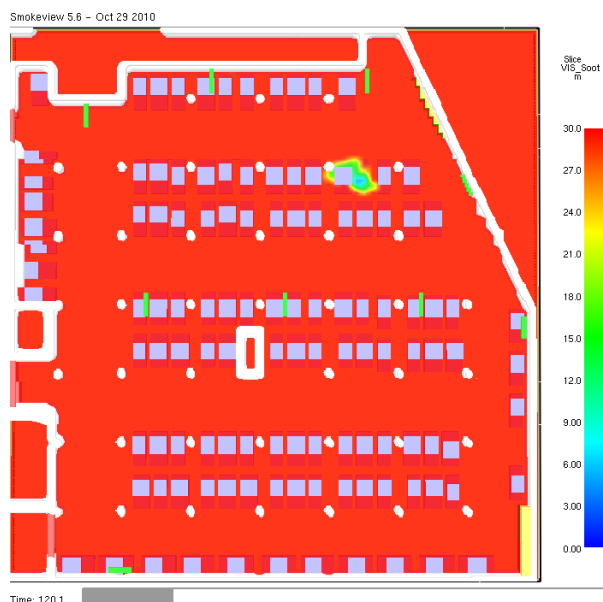


Figura 52 - Campo de visibilidade no instante t=120s

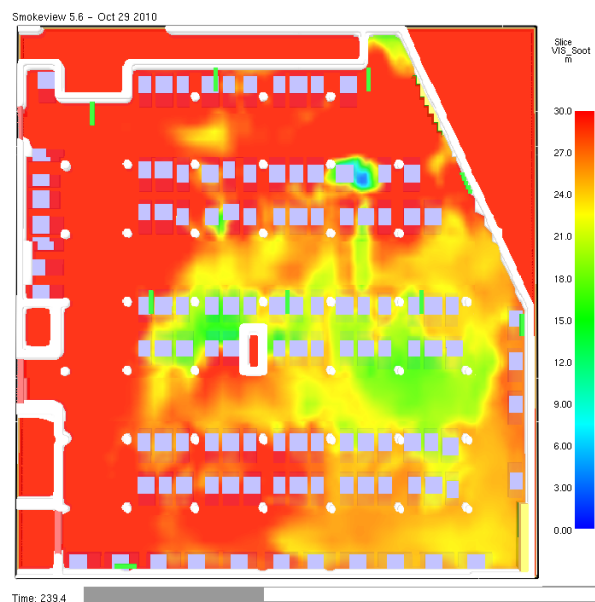


Figura 51 - Campo de visibilidade no instante t=240s

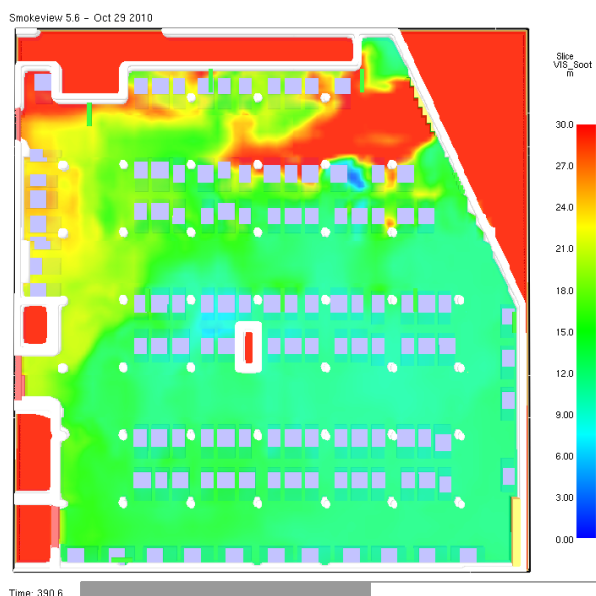


Figura 49 - Campo de visibilidade no instante t=390s

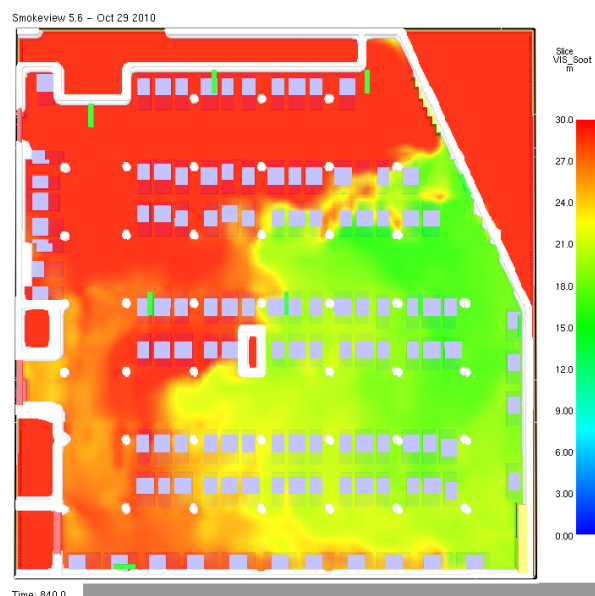


Figura 50 - Campo de visibilidade no instante t=840s

Olhando para as imagens acima pode-se concluir que numa fase inicial à cota de 1.7m de altura não existe ainda grande concentração de fumo pois o indicador de visibilidade não se altera sem ser na zona do fogo, mas à medida que o incêndio vai evoluindo a visibilidade vai

diminuir e aos 390s (figura 49) podemos observar que a visibilidade já está bastante diminuída. A partir do momento em que o fogo está extinto pode-se verificar uma tendência do indicador de visibilidade de voltar à situação inicial, tal como indica a figura 50 que representa o instante final da simulação.

### 10.3. Sumário Final

#### Modelação

Em termos de modelação verificou-se a importância do desenho / modelação dos veículos no parque no escoamento do ar, talvez se pudesse criar mais um ou dois tipos de veículos e gerar uma distribuição aleatória, dado que na realidade não existe num parque de estacionamento sempre o mesmo modelo de veículos.

#### Análise de escoamentos

Na análise de escoamentos, nomeadamente as simulações que correspondem à presença de veículos ou não, pode-se verificar o que já foi dito anteriormente quanto ao facto da influência da presença dos veículos como restrição ao escoamento.

Em termos de análise vectorial pode-se verificar que como seria de esperar os vectores velocidade estão todos orientados no sentido de criar uma circulação no interior do parque de forma a minimizar as zonas de estagnação, e não se verifica zonas de cruzamento de correntes.

#### Ventilação de Impulso

Quando se liga a ventilação impulso o aspecto mais importante de se referir será talvez o facto de as zonas que anteriormente estariam perto das estagnação com o accionamento dos ventiladores de impulso vai existir uma maior turbulência no escoamento o que é benéfico para a circulação do ar no interior do parque de estacionamento.

#### Simulação Final

Na simulação final que inclui a fonte de calor o aspecto mais importante de referir será talvez a influência que o foco de incêndio produz no escoamento e nas imagens é bem visível a sua influência alterando os jactos dos ventiladores de impulso.

Em termos das simulações de temperatura o aspecto mais importante a retirar será talvez realçar o efeito dos ventiladores de impulso e das zonas de admissão e extracção, que provocam uma mistura do ar e obrigam a que exista uma movimentação do ar de forma a nunca existir temperaturas demasiadamente elevadas em todo o parque, sem ser claro na fonte de calor.

Em termos de visibilidade pode-se concluir que o parque estará bem projectado dado que mal a fonte de calor desaparece a visibilidade no interior do parque começa a aumentar, não se verificando nenhuma zona de acumulação de fumo, ou seja, de estagnação.

## 11. Conclusão

Utilizando o programa FDS como ferramenta de cálculo do parque de estacionamento pode-se concluir que numa primeira aproximação pode ser credível a sua utilização embora ainda existam outros aspectos que teriam de ser discutidos para comprovar realmente a veracidade das simulações obtidas com o software, embora ele seja acreditado e bastante utilizado como referência nos Estados Unidos da América.

Verificou-se, no entanto, comparando com outros softwares e até mesmo como uma experiência real que o programa apresenta resultados coerentes e que não diferem muito dos dados consultados.

Quanto ao parque de estacionamento propriamente dito, tendo em conta os resultados obtidos através do programa pode-se concluir que o parque estaria bem projectado e que numa situação de emergência se os equipamentos funcionassem o edifício iria reagir de forma correcta ao problema.



## 12.Bibliografia

- *FDS User Guide.*
- *FDS Technical Reference Guide*
- *FDS Validation Guide*
- *FDS Numerical Verification Guide*
- J. Viegas. The use of jet fans to improve the air quality in underground car parks. 2006. LNEC.
- J. Viegas and J. Saraiva. Avaliação com recurso a cfd da aplicação de ventiladores de impulso a parques de estacionamento cobertos. LNEC. 2006.
- J. Viegas and J. Saraiva. Cfd. study of smoke control inside enclosed car parking using jet fan. LNEC. 2007.
- Rui M. Barata. An Approach to Ventilation Design Application to LoureShopping case. IST. 2009.
- B.J.M. v.d.Giesen, S.H.A. Penders, M.G.L.C. Loomans, P.G.S. Rutten and J.L.M. Hensen. Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures. da Universidade de Eindhoven. Holanda. 2011.